UNIVERSITÄT ROSTOCK
FAKULTÄT FÜR INFORMATIK UND ELEKTROTECHNIK
Institut für Angewandte Mikroelektronik und Datentechnik

Diplomarbeit

Positionsbestimmung mittels positionssensibler, zweidimensionaler Photodioden

Bearbeiter:	cand. ing. Jens Schulz
Studiengang:	Informationstechnik / Technische Informatik
Matrikelnummer:	001201933
Tag der Ausgabe:	01.08.2006
Tag der Abgabe:	01.02.2007
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Ralf Salomon
Gutachter:	Dr.-Ing. Thomas Mundt

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis ii

Abkürzungsverzeichnis iv

Abbildungsverzeichnis v

Tabellenverzeichnis vii

Aufgabenstellung 1

Zusammenfassung 2

1 Einleitung 3

2 Stand der Technik 11
- 2.1 Technische Verfahren zur Positionsbestimmung . . . 11
- 2.2 Visuelle Positionsbestimmung . . . 13
  - 2.2.1 Wahl einer geeigneten Lichtquelle . . . 13
  - 2.2.2 Filterung des vorhandenen Lichtes . . . 15
- 2.3 Positionsbestimmung mittels existierenden Prototyps . . . 16
  - 2.3.1 Die Optik . . . 16
  - 2.3.2 Optische Sensoren zur Positionsbestimmung . . . 22
  - 2.3.3 Aufgaben der analogen Schaltung . . . 28
  - 2.3.4 Bewertung des Prototyps . . . 28

3 Indoor Lokalisierung mittels positionssensibler, zweidimensionaler Photodiode 30
- 3.1 Überprüfung des Versuchaufbaus . . . 30
  - 3.1.1 Experimentelle Ermittlung der Brennweite der Optik . . . 32
  - 3.1.2 Nachjustierung der Platine . . . 34
  - 3.1.3 Untersuchung und Vergleich der vorhandenen Schaltung mit der Schaltung des C9069 Hamamatsu Referenzboards . . . 34
- 3.2 Experimentelle Ermittlung des Öffnungswinkels der Optik . . . 41
- 3.3 Messungen mit einem IR Filter . . . 43
- 3.4 Messungen im Gebäude . . . 44

3.5 Auswertung der Ergebnisse 48
3.5.1 Auswertung des prototypischen Aufbaus 48
3.5.2 Auswertung der Experimente 55
3.5.3 Auswertung der Erfassungsgenauigkeit einer Lichtquelle in Abhängigkeit von der Entfernung 65

4 Diskussion **69**

5 Softwareentwicklung mit QT **71**

Literaturverzeichnis **73**

6 Anhang **76**

Abkürzungsverzeichnis

μA	Mikro Ampere
μm	Mikro Meter
Ω	Ohm
Pi	Pi
2D	zweidimensional
A_O	Kugeloberfläche
A-/D-Wandler	Analog-/Digital-Wandler
Abb.	Abbildung
AGPS	Assisted Global Positioning System
CC1010DK	Development Kit des Unternehmens ChipCon
CCTV	Closed Circuit Television
digit	digitale Einheit
E_V	Fotoempfindlichkeit
F	Fokus
GΩ	Giga Ohm
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
Hz	Hertz
ID	Identifikationsnummer
kHz	Kilo Hertz
kW	Kilo Watt
m	Milli Meter
MΩ	Mega Ohm
MHz	Mega Hertz
nA	Nano Ampere
nm	Nano Meter
OPS	Optischer Positionssensor
OPV	Operationsverstärker
pA	Piko Ampere
PDF	Portable Document Format
pin-Diode	positive intrinsic negative diode
PMOS	p-channel metal-oxide semiconductor
PSD	Position Sensitive Detector
QT	Quasar Toolkit (Softwarebibliothek der Firma Trolltech)

r	Radius
RF	Radio Frequency
V	Volt
VDM	Verband Deutscher Mühlen
vgl.	vergleiche
W	Watt
WLAN	Wireless Local Area Network

Abbildungsverzeichnis

1.1 Getreideschädlinge links: Getreideplattkäfer Mitte: Kornkäfer rechts: Rotbrauner Reismehlkäfer[11] 5
1.2 Die mobile Misch-Schnecke „Kornknecht“[5] 5
1.3 „Kornknecht“ als Tandemgerät[5] 7
1.4 Vom „Kornknecht“ durchmischtes Getreide[5] 7
1.5 Schematische Darstellung des Getreidesilos mit Messoptik und „Kornknecht“ 9
1.6 Schematischer Aufbau der Messeinrichtung 9

2.1 Grundlegende Lokalisierungssysteme 12
2.2 kardanische Aufhängung nach Geronimo Cardano[8] 14
2.3 Strahlenverlauf bei Sammellinsen[7] 17
2.4 Darstellung der Brennebene einer Linse[18] 18
2.5 Zur Verfügung gestellte CCTV Optik 19
2.6 Überwachte Getreidefläche bei 50 Grad Bildwinkel 20
2.7 100% der Getreidefläche horizontal überwacht 21
2.8 Positionsbestimmung in zwei Dimensionen 21
2.9 Prinzipieller Aufbau eines PSD auf Basis einer pin-Diode 22
2.10 Diskreter PSD mit paralleler Auswertung 23
2.11 PSD S5991-01 des Unternehmens Hamamatsu [17] 24
2.12 Lichtempfindlichkeit des PSD 5991-01 in Abhängigkeit von der Wellenlänge [17] 25
2.13 Auftretender Dunkelstrom im Bereich der möglichen Sperrspannung und gegebener Umgebungstemperatur [17] 26
2.14 Schematische Darstellung des S5991-01 [17] 27

3.1 Industriegehäuse mit Distanzring, Optik und integrierter Schaltung . 30
3.2 Schaltung mit PSD und nachträglich angelötetem Flachbandkabel . . 31
3.3 Schematische Darstellung der verwendeten Optik 32
3.4 Experimentelles ermitteln der Brennweite 33
3.5 Schaltplanentwurf des Prototyps 35
3.6 Blockschaltbild des Referenzboards C9069 von Hamamatsu[16] 37
3.7 Schaltzeichen für Operationsverstärker 38
3.8 Aufbau des OPV Package LM324 [[15]] 39

3.9 Aufbau der analogen Schaltung nach Referenzschaltung des Prototyps 42
3.10 Bestimmung des halben Blickwinkels der Optik 43
3.11 IR Filter für Beschränkung der Wellenlängen 44
3.12 Versuchsaufbau für die Messung im Gebäude 45
3.13 Linsenvergleich der verwendeten Objektive 47
3.14 X-/Y-Koordinaten des PSD bei unterschiedlicher Beleuchtung vor Justierung der Platine 50
3.15 Diodenkennlinie liefert Rückschluss auf fließenden Strom[21] 51
3.16 X-/Y-Koordinaten der Platine 52
3.17 Eingestellter und gemessener Winkel des einfallenden Lichtes für die X-Koordinate bei Dunkelheit 60
3.18 Eingestellter und gemessener Winkel des einfallenden Lichtes für die Y-Koordinate bei Dunkelheit 61
3.19 Eingestellter und gemessener Winkel des einfallenden Lichtes für die X-Koordinate unter Einfluss von Tageslicht 62
3.20 Eingestellter und gemessener Winkel des einfallenden Lichtes für die Y-Koordinate unter Einfluss von Tageslicht 63
3.21 Eingestellter und gemessener Winkel des einfallenden Lichtes für die Y-Koordinate mit dem Laser als Lichtquelle 63
3.22 Eingestellter und gemessener Winkel des einfallenden Lichtes für die Y-Koordinate mit dem Docter-Wetzlar-Jena Objektiv 64
3.23 Entfernungsmessung der Lichtquelle bei Dunkelheit 66
3.24 Entfernungsmessung der Lichtquelle bei Tageslicht 66
3.25 Entfernungsmessung der Lichtquelle mit lichtstärkerer Optik 67

5.1 Grafische Oberfläche der Darstellungstellungssoftware 72

6.1 Eagle Schematic des neuen Prototyp 76

Tabellenverzeichnis

3.1 Strommessungen an den Ausgängen des PSD 50
3.2 Messwerte nach Justierung des PSD mit der optischen Achse 52
3.3 Ergebnisse des Ausmessens verschiedener LM324-Bausteine 54
3.4 Bestimmung des Blinkwinkels der Optik 55
3.5 Verschiebung der Lichtquelle unter einem Winkel von 0 Grad ohne Höhendifferenz zwischen Lichtquelle und Kamera 57
3.6 Verschiebung der Lichtquelle unter einem Winkel von 0 Grad mit Höhendifferenz zwischen Lichtquelle und Kamera 58
3.7 Normierte Mittelwerte und berechnete Winkel der X-Koordinate bei Dunkelheit 60

Aufgabenstellung

Positionsbestimmung mittels positionssensibler, zweidimensionaler Photodioden

Die Positionsbestimmung innerhalb geschlossener Räume mittels einfacher und kostengünstiger Methoden ist nach wie vor eine Aufgabe mit vielen Herausforderungen. Im Gegensatz zu typischen Anwendungen im Freien können zum einen Verfahren wie GPS u.ä. nicht eingesetzt werden und zum anderen sind die Anforderungen bezüglich Genauigkeit und Energieverbrauch häufig höher.

Ausgehend von einem existierenden, prototypischen Versuchsaufbau soll im Rahmen dieser Diplomarbeit ein vollständiges System entworfen und aufgebaut werden. Dazu soll in einem ersten Schritt die analoge Eingangsstufe (bestehend aus Operationsverstärkern) bezüglich der Referenzschaltung des Herstellers untersucht, beurteilt und ggf. optimiert werden. In einem weiteren Schritt soll unter Ausnutzung der existierenden Schaltungsentwürfe die notwendige analog-digital Umsetzung realisiert werden.

Vier dieser Sensoreinheiten werden mittels eines weiteren Steuerrechners zu einem vollständigen System aufgebaut. In diesem wird aus den Sensordaten die x/y/z-Position eines Leuchtkörpers berechnet. Zur grafischen Anzeige/Animation der Positionsangaben sowie weiterer Systemparameter und Einstellgrößen soll eine grafische Oberfläche entwickelt werden, die auf der frei verfügbaren Grafikbibliothek Qt basiert.

In den experimentellen Arbeiten soll untersucht werden, wie die Genauigkeit der berechneten Position von den Umgebungsbedingungen wie z.B. der Umgebungshelligkeit und Streulicht abhängt. Dazu gehören auch die experimentelle Bestimmung der maximalen Raumgröße bei gegebener Helligkeit der Umgebung sowie des Leichtkörpers. In weiteren experimentellen Arbeiten ist der Einsatz verschiedener Kompensationsmöglichkeiten zu untersuchen. Dazu gehören die Fehlerkompensation mittels zusätzlicher Sensoren (z.B. Helligkeitssensoren) sowie der Berücksichtigung der abgeschätzten Position. Diese Möglichkeiten zur Fehlerkompensation sollen ebenfalls durch geeignete Elemente der grafischen Bedienoberfläche unterstützt werden.

Zusammenfassung

Zur Positionsbestimmung innerhalb geschlossener Gebäude existieren bis heute wenige zuverlässige und genaue Verfahren. Im Freien verwendete Verfahren wie GPS oder Radar erweisen sich als Indoor-System als ungeeignet. Zum einen sind die Anforderungen bezüglich der Genauigkeit der Positionsbestimmung in geschlossenen Räumen häufig höher, zum anderen darf der Kostenfaktor nicht außer Acht gelassen werden. Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Positionsbestimmung mittels positionssensibler, zweidimensionaler Photodioden in Getreidesilos.

Als Grundlage dieser Diplomarbeit dient ein bereits existierender prototypischer Versuchsaufbau. Er besteht aus Lichtquelle, Optik, zweidimensionaler Photodiode und analoger Eingangsstufe. Eine Untersuchung jeder Komponente zeigt, ob sie optimiert oder ersetzt werden muss oder ohne Einschränkung verwendbar ist.

Im Wesentlichen besteht die gegebene Schaltung aus Operationsverstärkern. Eine Vergleich dieser mit der Referenzschaltung des Herstellers zeigt sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede auf.

Es folgt eine Optimierung und Erweiterung des prototypischen Versuchaufbaus. Dazu wird die Brennweite und der Öffnungswinkel der Optik experimentell bestimmt. Die Wahl der Lichtquellen sowie der Einsatz von Filtern wird untersucht. Für die spätere Ausgabe werden die errechneten X-/Y-Werte und die Lichtintensität mit Hilfe eines Mikrokontrollers digitalisiert. Über eine grafische Oberfläche ist es möglich, die Position des Lichtpunktes auf der Messeinheit auszugeben.

Messungen unter unterschiedlichen Bedingungen im Labor und in einem Verbindungsflur geben Aufschluss über die Genauigkeit der gemessenen Werte.

Die Ergebnisse der Messungen im Zwischengang zeigen unter anderem folgendes auf: Die verwendete Schaltung ist bei maximaler Gegenkopplung der Strom/ Spannungs-Wandlung und unter optimalen Bedingungenbis bis zu einer Entfernung von 15,73m einsetzbar. Während der Messungen muss die Gegenkopplung der Strom/Spannungs-Wandlung permanent nachgeregelt werden. Der Einsatz einer sehr starken Lichtquelle ist unumgänglich. Störungen, wie 50Hz Netzfrequenz oder zusätzlich einfallendes Licht wirken sich extrem negativ auf die Messergebnisse aus.

1 Einleitung

Diejenigen Nahrungsmittel, die mengenmäßig den Hauptbestandteil der menschlichen Ernährung ausmachen, werden als Grundnahrungsmittel bezeichnet. Die Grundversorgung an Kohlenhydraten, Eiweiß und Fett wird durch Grundnahrungsmittel sicher gestellt. Eine ausreichende Versorgung mit Vitaminen und Spurenelementen können sie nicht in jedem Fall gewährleisten. Zu den weltweit wichtigsten Grundnahrungsmitteln gehören Getreide wie Weizen, Roggen, Gerste oder Reis, Speicherwurzeln wie Kartoffeln, Möhren und Rüben oder Yams und Hülsenfrüchte wie Linsen und Bohnen bzw. daraus hergestellte Produkte wie Brei und Brot. Eiweißquellen, wie Fisch, Fleisch, Milch und Eier, werden ebenfalls zu den Grundnahrungsmitteln gezählt.

Regionale Unterschiede beim Konsumieren von Nahrungsmitteln hängen stark von kulturellen, klimatischen und wirtschaftlichen Faktoren ab. Heutzutage dienen kaum mehr als zehn Nahrungsmittel als echte Grundnahrungsmittel für den überwiegenden Teil der Weltbevölkerung. Bis heute ist es nicht gelungen, die stetig steigende Weltbevölkerung permanent mit Lebensmitteln zu versorgen. Länder wie Indien und China, nutzen auch den kleinsten Landstrich um Nahrungsmittel anzubauen. Trotzdem ist es ihnen kaum möglich, die gesamte Bevölkerung ausreichend zu versorgen. In Europa hingegen fördert die Europäische Union die Stilllegung von Ackerflächen und weiterhin bleibt eine Versorgung der Bevölkerung mit allen erforderlichen Nahrungsmitteln gesichert.

Im Jahr 2006 werden die Ernteerträge geringer ausfallen als in den Jahren zuvor. Der Verband Deutscher Mühlen (VDM) teilte am 28. August 2006 in Bonn mit, dass sich das Mehl aus deutschen Mühlen nach Angaben des Branchenverbandes in diesem Jahr deutlich verteuern wird. Als Begründung gibt der VDM an [3]:

> Die lang anhaltende trockene Witterung in diesem Sommer, sowie der danach einsetzende Regen habe bei Getreide zu erheblichen Ertragseinbußen geführt. Deswegen lägen die Preise rund 50 Prozent über dem Vorjahresniveau.

Nicht nur ungünstige Witterung und die damit verbundenen Ernteverluste lassen die Preise für Getreide und Folgeprodukte steigen. Wenn Getreide durch Schädlinge befallen oder mit Restfeuchtigkeit in Silos eingelagert wird, beginnt es zu verderben. Durch diese Umstände sind ebenfalls finanzielle Schäden zu befürchten.

Durch Witterungseinflüsse entstandene Schäden lassen sich nicht vermeiden. Dem Befall von Schädlingen kann in begrenztem Maße mit biologischen und chemischen Mitteln vorgebeugt werden. Die Getreide-Lagerstabilisierung hat die Aufgabe, Lagerschäden zu minimieren oder zu verhindern.

Durch fehlende oder falsche Belüftung sowie durch unzureichende Trocknung von Getreide, Ölsaaten und Körnerleguminosen[1] entstehen jedes Jahr immense finanzielle Schäden. Diese Schäden können gemindert werden, wenn das existierende Grundlagenwissen gezielt umgesetzt wird. Bei Lagerbegin muss eine Tatsache bereits bekannt sein: „Die Eingangsqualität von frisch geerntetem Getreide kann nur gehalten - nicht aber verbessert werden!“[2]

Qualitätsminderung oder gar das Verderben von Getreide kann auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden. Zum einen können schädliche Mikroorganismen wie Hefen, Pilze und Bakterien, aber auch Getreideschädlinge wie z.B. der Kornkäfer, der Getreideplattkäfer und der Reismehlkäfer (vgl. Abb. 1.1) genannt werden. Ausreichend feuchtes, warmes, sauerstoffhaltiges und pH-neutrales Milieu im Getreidestapel ermöglicht Mikroorganismen - allen voran Pilzen - ihre Existenz. Die Lagerstabilisierung will diesen Konstitutionen entgegenwirken. Aus diesem Grund erfolgt eine Trocknung, Reinigung und Belüftung des Getreides.

[1] Der Name Leguminosae wurde von Michel Adanson im Jahr 1763 geschaffen. Leguminosen, auch Hülsenfrüchtler genannt, sind eine der artenreichsten Pflanzenfamilien. Zu ihnen gehören Erbsen, Ackerbohnen, Lupinen, Wicken, Erdnüsse wie auch Luzerne, Rotklee und Esparsette.

Abbildung 1.1: Getreideschädlinge links: Getreideplattkäfer Mitte: Kornkäfer rechts: Rotbrauner Reismehlkäfer[11]

Das Unternehmen Wellenbrock beschäftigt sich mit den genannten Problemen sowie mit der Förderung, Befüllung, Lagerung und dem Beizen von Getreide. Für die unterschiedlichen Bereiche entwickelte das Unternehmen verschiedene Geräte. So wird neben Umlauf- und Durchlauf-Trocknern eine Misch-Schnecke für die Lagerbelüftungstrocknung vertrieben.

Oft verfügen diese Anlagen über sehr große Abmaße und müssen, wenn es sich nicht um mobile Anlage handelt, in den Silos installiert werden. Die dabei anfallenden Anschaffungs- sowie die Wartungskosten sind für kleinere Unternehmen und private Bauern unrentabel. Sie benötigen Trocknungs- und Belüftungsanlagen, die sich auf absehbare Zeit amortisieren.

Abbildung 1.2: Die mobile Misch-Schnecke „Kornknecht“[5]

Um diesen Kundenstamm zu erreichen, entwickelte das Unternehmen Wellenbrock eine mobile Misch-Schnecke mit dem Vertriebsnamen „Kornknecht“ (vgl. Abb. 1.2). Eine Aufgaben des „Kornknechts“ besteht im Homogenisieren des Getreidestapels. Dazu bewegt er sich über den Getreidestapel und durchmischt dabei mit einer Förderschnecke das Getreide. Das tiefer liegende Getreide wird vertikal nach oben befördert und an der Oberfläche ausgestoßen. Durch den Ausstoß des Getreides bewegt sich der Roboter nach dem Rückstoßprinzip vorwärts. Dieses Förderprinzip lockert das Getreide auf. Zudem wird es fließfähig gehalten. Der „Kornknecht“ beseitigt Wärmenester und sorgt für eine bessere Belüftung. Dies intensiviert die Lagerbelüftungstrocknung und ermöglicht höhere Trocknungstemperaturen.

Die mobile Misch-Schnecke wird, wie in Abb. 1.2 zu sehen ist, über einen Getriebemotor mit Motorschutzschalter angetrieben. Der Motor befindet auf dem ca. 85cm großen Spezialgehäuse und besitzt eine Leistungsaufnahme von 2,2kW . Weiterhin befindet sich die Steuerung direkt am Gehäuse. Drei unterschiedlich lange Förderschnecken zwischen 1,5m und 4m stehen zur Verfügung. Die Schnecke wird auf der Unterseite eingesetzt. Der Durchmesser der Schnecken variiert ebenfalls in Abhängigkeit der Schneckenlänge zwischen 60mm und 80mm. Mit einer 2m langen Schnecke wiegt der „Kornknecht“ ca. 38kg. Für eine erleichterte Handhabung und eine doppelte Arbeitsgeschwindigkeit werden zwei „Kornknechte“ über eine Kupplung zu einem Tandem miteinander verbunden (vgl. Abb. 1.3). Die derzeitigen Kosten für das Tandemgerät liegen bei ca. 7.000€.

Nachdem die ausgewählte Schnecke am Gerät montiert wurde, wird es auf den Stapel gebracht. Dabei ist darauf zu achten, dass der „Kornknecht“ nicht in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt wird und die gewählte Schnecke keine Bodenberührung erlangen darf. Nachdem die Stromversorgung mit dem „Kornknecht“ hergestellt wurde, senkt sich die horizontal befindliche Schnecke selbstständig ab. Sobald die Schnecke senkrecht im Mischgut steckt, beginnt der Roboter sich fortzubewegen und arbeitet den Getreidestapel durch.

Mit dem Einbringen des Getreides in den Silo ist dieses zunächst un-

Abbildung 1.3: „Kornknecht“ als Tandemgerät[5]

gleichmäßig verteilt. Nach einem vollständigen Durchlauf des „Kornknechts“ entsteht eine gleichmäßige wellenförmige Oberfläche wie in Abb. 1.4 zu sehen ist.

Abbildung 1.4: Vom „Kornknecht“ durchmischtes Getreide[5]

Der „Kornknecht“ vereint die beschriebenen Vorteile, besitzt jedoch einen wesentlichen Nachteil. Er ist nicht in der Lage, den optimalen Weg für den Silo zu erkennen und abzufahren. Somit ist eine Bedienperson für die Steuerung verantwortlich. Diese Person verursacht

weitere Kosten, was die Attraktivität des „Kornknechts“ schmälert. Aus diesem Grund wird eine geeignete Lokalisierung und Steuerung benötigt, die es dem „Kornknecht“ ermöglicht, den Getreidestapel autonom und systematisch zu durchmischen.

Die Aufgabe der Lokalisierung und Steuerung wurde in zwei Projekte geteilt. Das Unternehmen Maaser gemis KG [6] übernahm die Steuerung. Die Probleme einer Strategie des Durchmischens und der Lokalisierung sollte vom Institut für Angewandte Mikroelektronik und Datentechnik der Universität Rostock gelöst werden.

Vor dem Hintergrund der Flächenabdeckung und des Steuerungsaufwandes wurde eine Studienarbeit [23] ausgeschrieben. In ihr wurden verschiedene Steuerungsstrategien untersucht. Zu diesen Strategien zählten:

- das Ping-Pong-Verfahren,
- das Ping-Pong-Verfahren mit zufälligen Richtungswechsel,
- die Spiralbewegung,
- die reguläre Bewegung.

Die Auswertung wurde unter den Gesichtspunkten der Flächenabdeckung, Parameterabhängigkeit, Positionsbestimmungsrate und Rechenaufwand durchgeführt.

Dabei stellte sich heraus, dass nur mit Hilfe der regulären Bewegung eine vollständige Flächenabdeckung in einer vorhersagbaren Zeit erreicht werden kann. Die reguläre Bewegung lässt sich auf zwei verschiedene Arten umsetzen. Eine gleichmäßige Hin- und Herbewegung stellt das erste Muster dar. Die zweite Variante ähnelt der Spiralbewegung. Hierbei bewegt sich der Roboter entlang der Außenkante und vergrößert dabei seinen Abstand zur Wand mit jeder vollen Umrundung des Silos.

Weiterhin brachte die oben erwähnte Studienarbeit als Ergebnis, dass die Steuerung bei diesem Verfahren nur von wenigen Parametern abhängt, die Positionsbestimmungsrate und der Rechenaufwand jedoch als relativ hoch eingestuft werden müssen.

Damit der „Kornknecht“ mit technischen Hilfsmitteln gesteuert werden kann, muss er zunächst geortet werden. In dieser Arbeit erfolgt die Ortung mittels positionssensibler, zweidimensionaler Photodioden (PSD) . Damit lässt sich die Situation wie folgt beschreiben.

Eine Silohalle gefüllt mit Getreide soll von den Feuchte- und Wärmenestern befreit werden. Der „Kornknecht“ mit aufgesetzter Lichtquelle befindet sich an einer beliebigen Position auf dem Getreidestapel (vgl. Abb. 1.5). In den Ecken des Silos ist die Messoptik fixiert. Über bekannte mathematische Beziehungen lässt sich die Position der mobilen Misch-Schnecke errechnen.

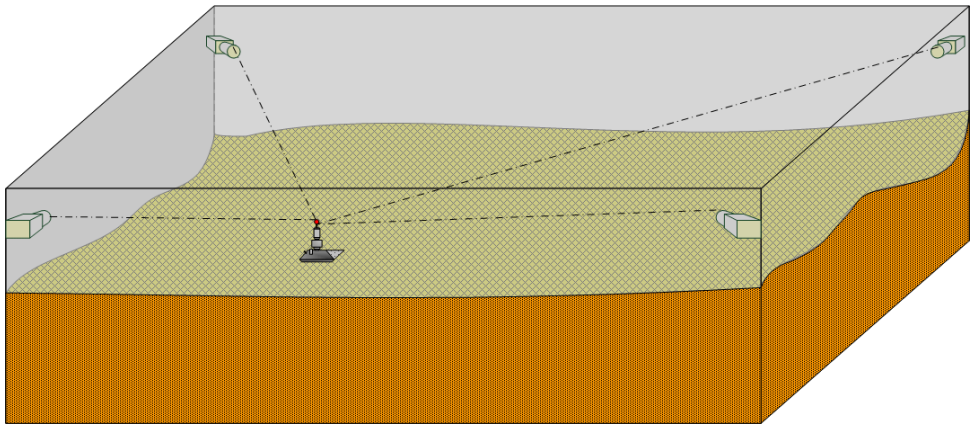

Abbildung 1.5: Schematische Darstellung des Getreidesilos mit Messoptik und „Kornknecht“

Es existieren Parameter, wie die Größe des Silos und einfallendes Licht z.B. durch Seitenfenster, die sich nicht beeinflussen lassen. An der Messeinrichtung befinden sich hingegen verschiedene Parameter die optimiert werden können. Die Erfassungseinrichtung ist wie in Abbildung 1.6 dargestellt gegeben.

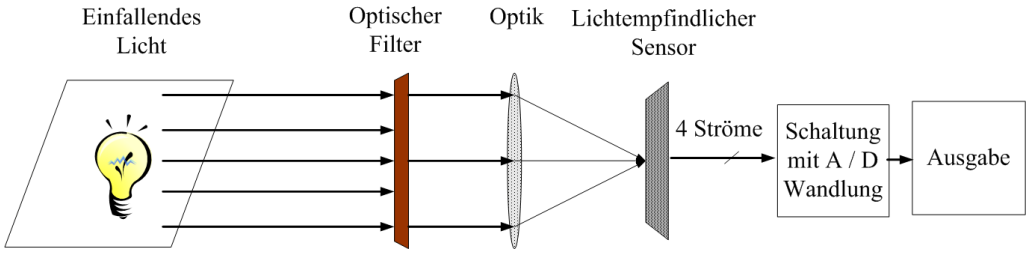

Abbildung 1.6: Schematischer Aufbau der Messeinrichtung

Eine Lichtquelle, z.B. ein Laserpointer oder eine sehr starke Glühlampe, sendet in Richtung der Optik einen Lichtstrahl aus. Gegebenenfalls wird das in die Optik einfallende Licht zuvor mit einem Filter begrenzt. Der Fokus der Optik liegt auf der Oberfläche des Sensors. Beim Auftreffen des Lichtes emittiert dieser 4 Ströme. Eine entsprechende analoge Schaltung wandelt die Ströme in Spannungen um und digitalisiert diese. Als letztes werden die digitalisierten Werte per Software weiterverarbeitet und schließlich ausgegeben.

2 Stand der Technik

2.1 Technische Verfahren zur Positionsbestimmung

In diesem Teil der Arbeit liegt der Fokus auf dem aktuellen technischen Stand. Bevor auf verschiedene Lokalisierungstechniken eingegangen werden kann, muss der Begriff der Lokalisierung erklärt sein. Lokalisierung ist wie folgt definiert [22]:

> Bei der Lokalisierung bestimmt eine Entität wo sie sich befindet. Ein Lokalisierungssystem übernimmt dabei die Zuordnung von symbolischen Systeminformationen zu einem Objekt in der realen Welt.

Aus den Ergebnissen kann die Position errechnet oder kombiniert werden. Durch Lokalisierung werden intelligente Anwendungen ermöglicht. Dies spielt z.B. beim *ubiquitous computing*[1] eine wichtige Rolle.

Um eine Position bestimmen zu können, sind verschiedene Lokalisierungstechniken denkbar. Die Triangulation ist ein Verfahren zur Bestimmung von Entfernungen und Flächen durch geometrische Eigenschaften von Dreiecken. Die zweite Methode, die Lateration, bedient sich zum Messen des Abstandes zu einem Referenzpunkt. Die Angulation ähnelt der Lateration, jedoch werden hier Winkel gemessen.

Weil weder ein universelles noch ideales Lokalisierungssystem existiert, muss zunächst eine grobe Unterteilung vorgenommen werden. Es lassen sich **Outdoor-** und **Indoor** Systeme unterscheiden (vgl. Abb. 2.1). Zu den Outdoor-Systemen zählen z.B. GPS und Radar.

[1] Der Begriff Ubiquitous Computing (engl. ubiquitous = allgegenwärtig) bezeichnet die Allgegenwärtigkeit der Informationsverarbeitung im Alltag von Unternehmen und Kunden [24].

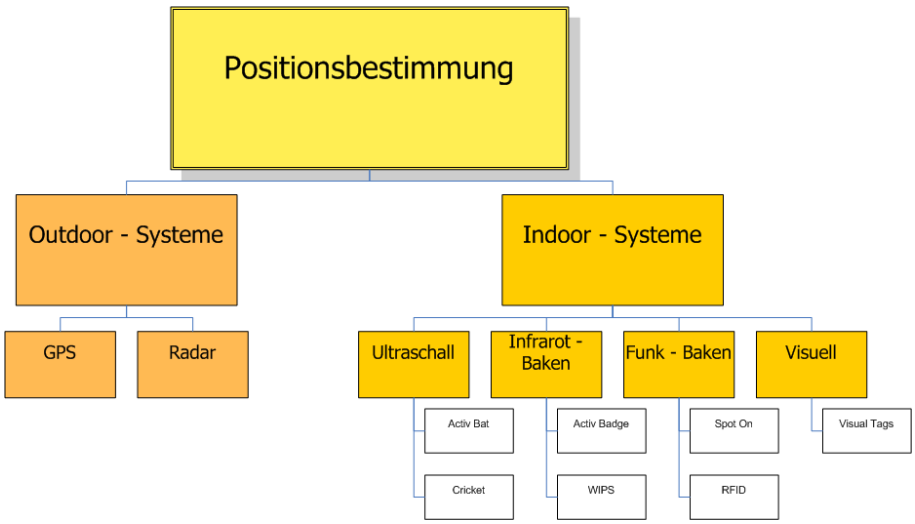

Abbildung 2.1: Grundlegende Lokalisierungssysteme

Beide kommen aufgrund ihres Einsatzbereiches außerhalb geschlossener Räume sowie ihres Auflösungsvermögens (Genauigkeit von 5-10m) und aus Kostengründen für das Kornknecht-Projekt nicht in Frage. Auch Verfahren wie „ Assisted GPS“ (AGPS) reichen trotz einer Genauigkeit von ca. 1m für die Ortung der mobilen Misch-Schnecke nicht aus. [4] [2]

Da der „Kornknecht“ in einer geschlossenen Halle arbeitet, ist der Einsatz von Indoor-Systemen notwendig. Diese lassen sich, wie in Abb. 2.1 gezeigt, erneut unterteilen. Die aufgeführten Indoor-Systeme wurden in den Arbeiten [26] und [14] näher untersucht und veröffentlicht.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Problematik der visuellen Positionsbestimmung in geschlossenen Räumen. Im Speziellen wird mit Hilfe von optischen Sensoren eine Positionserkennung durchgeführt.

[2] AGPS setzt auf eine grobe Ortung innerhalb des Mobilfunknetzes. Um den Standort zu bestimmen, ist im ersten Schritt der Empfang von mindestens zwei Basisstationen notwendig. Diese Informationen werden verwendet, um den Suchbereich für die Satellitensignale einzuschränken und somit die Messung zu beschleunigen. Exakt vermessene Referenzempfänger lesen die Satellitendaten. Der mobile Empfänger muss dann nur die Ankunftszeiten der Satellitensignale messen, um seine eigene Position zu bestimmen.

2.2 Visuelle Positionsbestimmung

Eine visuelle Positionsbestimmung kann dann durchgeführt werden, wenn sich das zu detektiere Objekt im Sichtfeld des oder der Sensoren befindet. Beim Einsatz der mobilen Misch-Schnecke ist dies der Fall (vgl. Abb. 1.5).

2.2.1 Wahl einer geeigneten Lichtquelle

Eine Lichtquelle wird in alle Richtungen gut sichtbar am „Kornknecht“ montiert. Welche Lichtquellen können als geeignet angesehen werden? Silohallen besitzen oft Seitenlängen von 50m oder mehr. Aus diesem Grund muss die Lichtquelle ausreichend leistungsfähig sein, damit die Kameras in den Ecken des Silos ihren Lichtpunkt als Lichtquelle gut wahrnehmen können. Der Energieverbrauch kann als nebensächlich angesehen werden, da jeder Motor der den „Kornknecht“ antreibt, eine elektrische Leistung von 2,2kW verbraucht.

Der Einsatz einer Laserlichtquelle erscheint zunächst als geeignet. Laserlicht ist aufgrund der starken Bündelung über große Distanzen gut zu erfassen. Problematisch ist die genaue Ausrichtung des Lasers. Er muss als Punkt auf die Kameras zielen. Durch die Bewegung des „Kornknecht“ im Getreidestapel ist es schwer, ihn zu verfolgen. Es ist erforderlich, ihn ständig zu korrigieren, damit er stets die Optik der Kamera trifft.

Abhilfe könnte ein rotierender Laser, ein so genannter Flächenlaser, schaffen. Durch die permanente Rotation des Laserpunktes zielt diese mehrmals pro Sekunde in jede Ecke des Silos. Eine Synchronisation wäre notwendig, damit die Messungen genau in dem Moment erfolgt, wenn der Laser zu einer Kamera ausgerichtet ist. Auch diese Lösung ist nur bedingt einsatzfähig. Die Getreideoberfläche im Silo ist uneben. Dadurch führt der „Kornknecht“ eine Auf- und Abwärtsbewegung durch.

Er kann sich auch in Schräglage befinden. Diese Bewegungen werden 1:1 auf den Laser übertragen. Damit ist es sehr unwahrscheinlich, dass

die Kameras in der Lage sein werden, ihn zu verfolgen. Abhilfe würde eine kardanische Aufhängung wie in Abb. 2.2 dargestellt bieten.

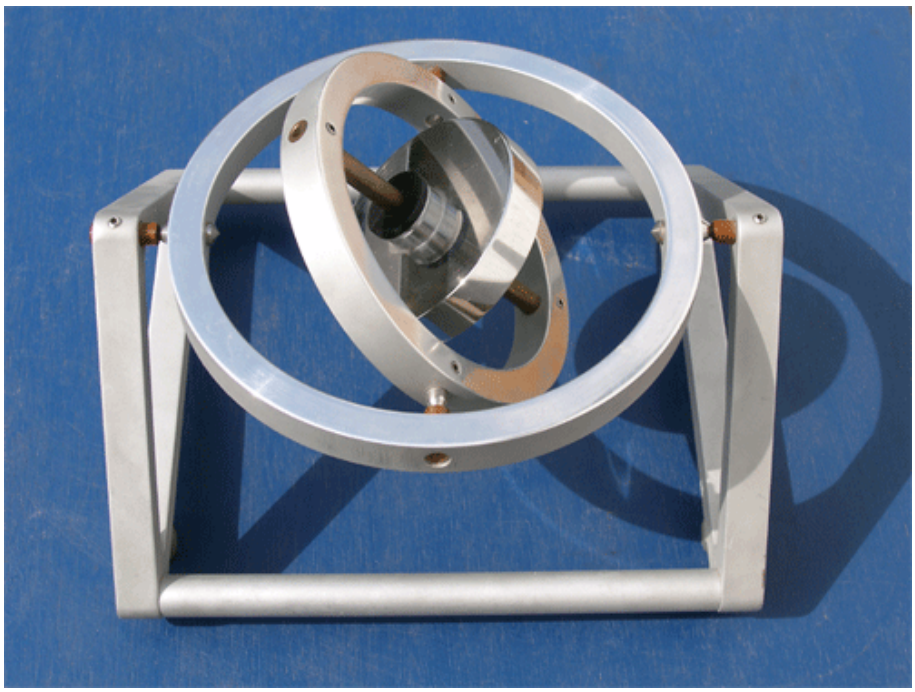

Abbildung 2.2: kardanische Aufhängung nach Geronimo Cardano[8]

Die kardanische Aufhängung wurde nach Geronimo Cardano (1501 - 1576) benannt, einem italienischen Arzt und Mathematiker. Die Kardanische Aufhängung ist eine Vorrichtung, um Messinstrumente (z.B. einen Schiffskompass) oder andere Gegenstände frei drehbar und unabhängig von Lage oder Bewegung (z.B. eines Schiffes) aufzuhängen. Technisch realisieren lässt sich die kardanische Aufhängung durch einen Metallring, in den zwei weitere Metallringe die Achsen jeweils um 90 Grad gegeneinander versetzt ineinander drehbar gelagert werden. Das Instrument wird dann am innersten Ring befestigt [8].

Als dritte mögliche Lösung kann eine sehr leistungsstarke (z.B. 300W) Glühlampe eingesetzt werden. Die Glühlampe kann als punktförmige Lichtquelle angesehen werden. Bedingte Bewegungen des „Kornknechts“ durch das aufgeschüttete Getreide können vernachlässigt werden, da selbst dann noch ausreichend Licht auf die Optik fällt, wenn sich der „Kornknecht“ in Schräglage befindet.

Probleme treten bei der optischen Positionserkennung auf, wenn neben

der primären Lichtquelle weitere, z.B. die Sonne oder Deckenbeleuchtung, vorhanden sind. Dies ist der Fall, wenn der Silo Fenster besitzt. Zwei oder mehr detektierte Lichtquellen führen zwangsläufig zu Fehlinterpretaionen bei der Berechnung des Lichtschwerpunktes und damit der Position der Misch-Schnecke.

Zum einen können pulsierende Lichtquellen eingesetzt werden. Um die genaue Position zu bestimmen, wird eine Messung bei eingeschalteter Lichtquelle und eine Messung bei ausgeschalteter Lichtquelle gemacht. Durch Subtraktion der Werte werden alle Lichtquellen neben der der Misch-Schnecke eliminiert.

2.2.2 Filterung des vorhandenen Lichtes

Zum anderen verbessert der Einsatz eines optischen Filters die Messergebnisse wesentlich. Der eingesetzte Filter muss einigen Spezifikationen entsprechen. Er wird einen großen Anteil des auftreffenden Lichtes eliminieren. Dies gilt sowohl für das Licht welches von der Misch-Schnecke eingestrahlt wird, als auch für das Licht der vorhandene Deckenbeleuchtung und die durch die Fenster einstrahlende Sonne.

Unter günstigen Umständen lassen sich somit Fehlerquellen wir z.B. Leuchtstoffröhren (gleichförmig, allseitig strahlend) beinahe ausschalten. Durch ihren hohen Wirkungsgrad (von etwa 90% [9]) wird nur ein sehr geringer Anteil der Energie in Wärme umgesetzt. Ein IR-Filter mit z.B. 850nm Wellenlänge vor der Optik würde die von einer Leuchtstoffröhre emittierten Wellenlängen nahezu eliminieren.

Nur ein geringes eletromagnetisches Spektrum tritt durch den Filter hindurch. Diese Frequenzanteile müssen ausreichen, damit der Sensor hinter der Optik signifikante Ströme erzeugen kann. Bei der Wahl des Filters muss natürlich auch auf den eingesetzten Sensor geachtet werden. Ein Filter, in einem Frequenzbereich in dem der Sensor besonders sensitiv ist, verbessert die Messergebnisse ebenfalls. Günstig ist also der Einsatz von PSDs, die besonders empfindlich bei größeren Wellenlängen oberhalb des menschlichen Sehvermögens arbeiten, und Filtern, welche auf die entsprechende Wellenlänge abgestimmt sind.

Der für diese Arbeit zur Verfügung gestellte IR-Filter lässt Licht mit einer Wellenlänge von 850nm passieren.

Fazit: Trotz der guten Voraussetzungen, die ein Laser bietet, wird er durch die schwere Erfassbarkeit nicht einsetzbar sein. Eine bessere Wahl bietet eine sehr starke Lichtquelle, die einen Großteil der abgegebenen Energie im IR Bereich besitzt. Pulsiert diese Lichtquelle, kann sie sehr gut von der Umgebung unterschieden werden. Eine weitere Voraussetzung für möglichst gut Messergebnisse liefert der Einsatz eines IR-Filters. Die IR-Bereiche von Lampe, Filter und Sensor müssen aufeinander abgeglichen sein.

In einem Fall versagen jedoch alle genannten Varianten: Die Unebenheiten durch das Schütten des Getreides beim Einlagern können derart groß werden, dass die gesamte Misch-Schnecke von den Kameras nicht mehr detektiert werden kann. Unter diesen Umständen versagen aber auch alle anderen optischen Verfahren.

2.3 Positionsbestimmung mittels existierenden Prototyps

In Abb. 1.6 wurden der Aufbau der Messeinrichtung, um die Position des „Kornknechts“ zu bestimmen, beschrieben. Zwei dieser Segmente, die Lichtquelle und der optische Filter, wurden bereits näher untersucht. Der existierende Prototyp besteht weiterhin aus Optik, einem optischen Sensor und einer analogen Schaltung. Diese Komponenten werden im Folgenden untersucht.

2.3.1 Die Optik

Grundlagen in der Optik

Der Begriff Optik stammt ursprünglich aus dem griechischen und trägt die Bedeutung „Lehre vom Sichtbaren“ oder auch „zum Sehen gehörig“[19]. Die Optik ist ein Teilbereich der Physik, welcher sich mit der Ausbreitung des Lichtes und deren Wechselwirkung mit

der Materie beschäftigt. Ein optisch wirksames Bauelement mit zwei lichtbrechenden Flächen, von denen mindestens eine Fläche konvex oder konkav gewölbt ist, wird als Linse bezeichnet [18]. Es existieren konkave, plane und konvexe Linsen sowie Kombinationen aus diesen. Abb. 2.3 zeigt eine Konvexlinse (Sammellinse).

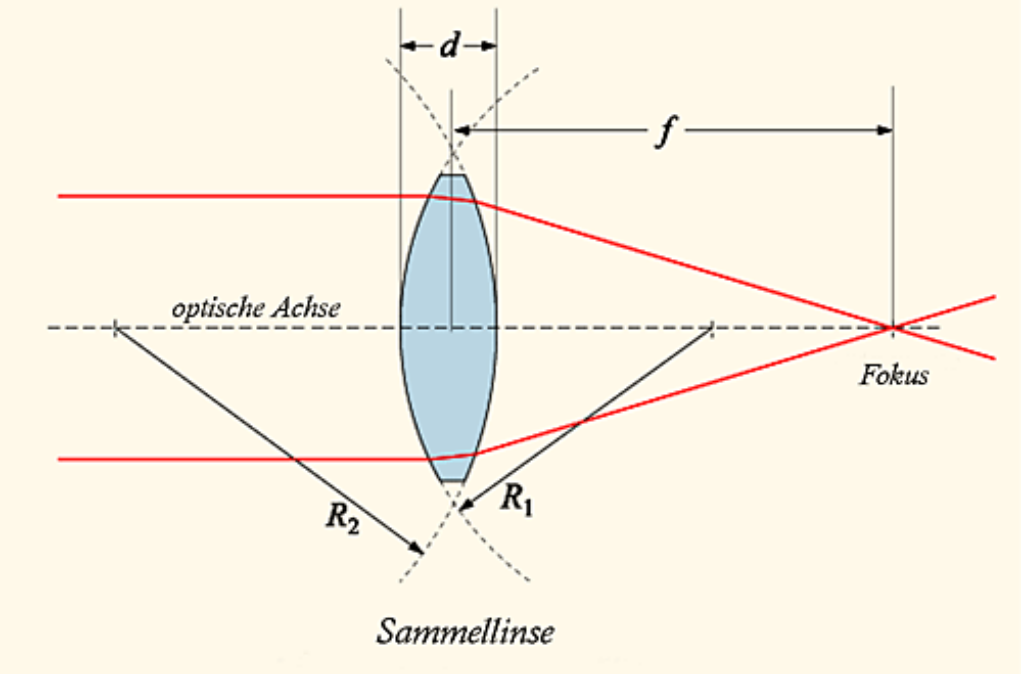

Abbildung 2.3: Strahlenverlauf bei Sammellinsen[7]

Die horizontal gestrichelte Gerade, auf welcher der Krümmungsmittelpunkt der Linse liegt, wird als optische Achse bezeichnet. Die roten Strahlen, die parallel zur optischen Achse verlaufen, entstammen einer in unendlicher Entfernung befindlichen Lichtquelle. Sie werden beim Eintritt und beim Austritt aus der Linse zur optischen Achse gebrochen und bündeln sich im Brennpunkt (Fokus) „F“. Die Linsendicke wird durch den Abstand „d“ definiert. Als Kreissegmente umfassen die Radien R1 und R2 die konvexen Oberflächen der Linse. Werden die Radien verlängert, so schneiden sie sich in zwei Punkten. Die entstandenen Schnittpunkte befinden sich auf der Linsenebene. Die Brennweite „f“ ist der Abstand der Linsenebene bis zum Brennpunkt “F“.

Unter der Annahme, dass es sich bei dem verwendeten Linsensystem um ideale Linsen handelt, kann davon ausgegangen werden, dass par-

allel zur optischen Achse verlaufende Lichtstrahlen sich nur im Brennpunkt auf der optischen Achse schneiden. Genau in diesem Punkt werden die auftreffenden Lichtstrahlen zu einem minimal kleinem Punkt gebündelt. Vor und hinter dem Brennpunkt weitet sich der Lichtpunkt wieder auf. Was aber passiert, wenn Lichtstrahlen nicht parallel zur

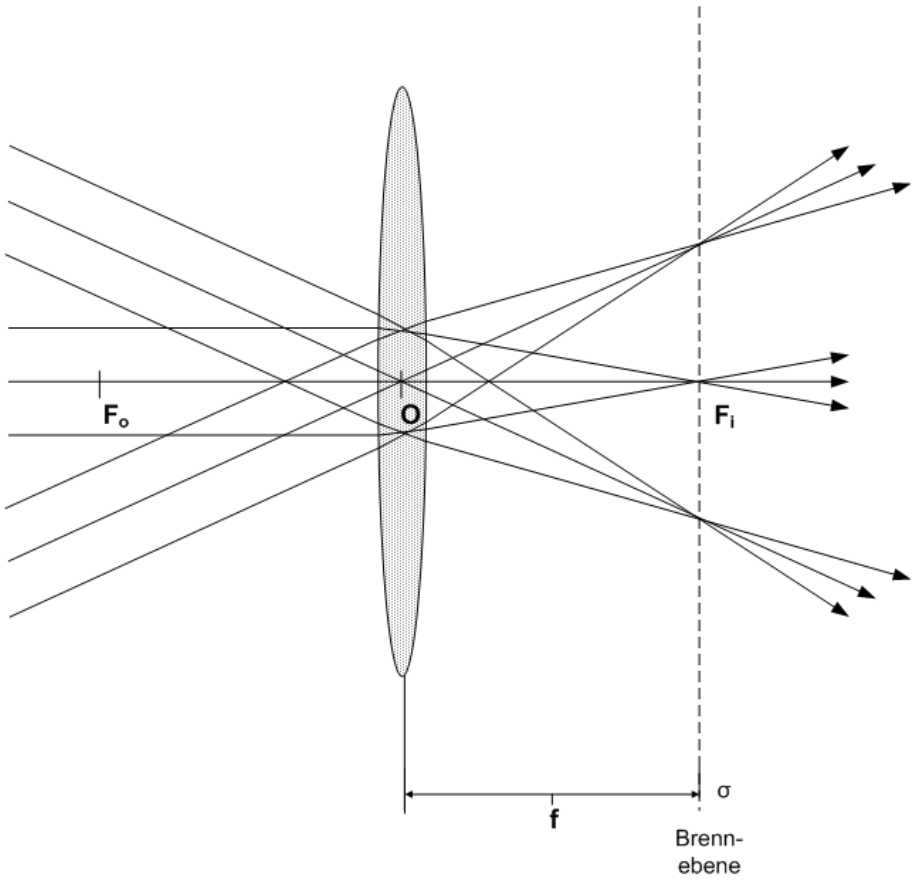

Abbildung 2.4: Darstellung der Brennebene einer Linse[18]

optischen Achse einfallen, sondern von schräg auf die Linse treffen. In diesem Fall werden die Lichtstrahlen nicht im Brennpunkt auf der optischen Achse gesammelt.

Der Fokus liegt dann ober- oder unterhalb der optischen Achse, jedoch weiterhin im Brennpunkt. Die Gesamtheit aller entstehender Brennpunkte wird als Brennebene bezeichnet. Die Brennebene, oder auch Fokalebene, ist eine gedachte Ebene, in der sich Strahlen schiefparallel auftreffenden Lichtes schneiden (vgl. Abb. 2.4). Um eine genaue Position mit dem optischen Sensor zu ermitteln, ist es notwendig, die

Sensorfläche in die Brennebene zu verlagern. Wie dies geschieht ist in Unterkapitel 3.1.1 aufgeführt.

Weitere Anpassungen der Optik

Objektive mit 40 bis 50 Grad Bildwinkel entsprechen dem natürlichen menschlichen Blickfeld. Hierbei handelt es sich um so genannte Normalobjektive. Im Kleinbildbereich besitzen diese Objektive eine Brennweite zwischen 45 und 60mm. Objektive mit kürzeren Brennweiten werden als Weitwinkelobjektive bezeichnet. Sie besitzen dann einen Bildwinkel größer als 50 Grad bis weit über 100 Grad. Neben den beiden genannten Objektiven müssen Fern- oder Teleobjektive erwähnt werden. Teleobjektive besitzen kleinere Bildwinkel als Normalobjektive [18].

Bei der zur Verfügung gestellten CCTV-Optik handelt es sich um ein Normalobjektiv im Digitalbereich (vgl. Abb. 2.5). Die sehr kur-

Abbildung 2.5: Zur Verfügung gestellte CCTV Optik

ze Brennweite von nur 8mm ist für Digitalkameras üblich und kommt durch die kleinere Chipfläche gegenüber der Bildgröße eines typischen

Kleinformatfilms zustande. Weiterhin befindet sich am Gehäuse der Optik je ein Stellring für die Blende und die Entfernung.

Soll der Kornknecht auf der rechteckigen Fläche eines Getreidesilos geortet werden und befindet sich in jeder Ecke eine Kamera, so ist es sinnvoll, Weitwinkelobjektive mit einem Bildwinkel von 90 Grad zu verwenden. Jede Kamera ist dann in der Lage, die gesamte Fläche zu überwachen und eine Position zu ermitteln. Aus den vier errechneten Ergebnissen könnte ein Schwerpunkt gebildet und so die Position genauer bestimmt werden. Die Verwendung von Normalobjektiven er-

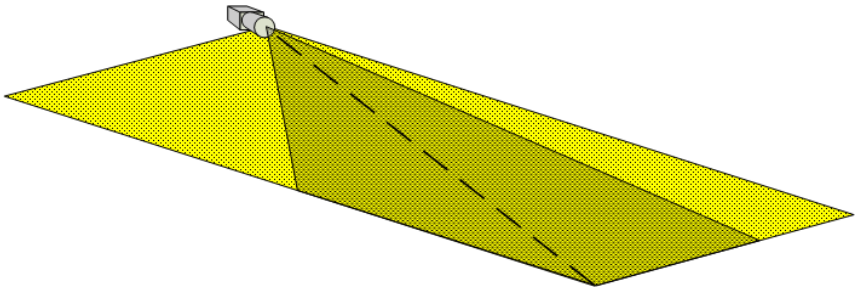

Abbildung 2.6: Überwachte Getreidefläche bei 50 Grad Bildwinkel

weist sich durch den kleineren Bildwinkel als problematisch. Steht die Kamera in der Ecke des Silos wie in Abb. 2.6 dargestellt, reicht der Bildwinkel nicht aus, um die gesamte Getreidefläche zu überwachen.

Abhilfe schafft ein rückwertiges Verschieben der Kamera entlang der Diagonalen des Getreidesilos bis der Bildwinkel ausreicht, um die gesamte Fläche zu überwachen (vgl. Abb. 2.7). Der zur Verfügung gestellte Sensor ist in der Lage zwei Dimensionen (X $\widehat{=}$ Horizontale, Y $\widehat{=}$ Vertikale) zu erfassen. Durch das Zurücksetzen der Kamera kann die Lichtquelle auf dem Kornknecht in der Horizontalen verfolgt werden.

Um die genaue Position des Kornknechts zu bestimmen, fehlt eine entscheidende Information: die Tiefe. Die zweite Dimension des Sensors wird zur Bestimmung der Tiefe verwendet. Verbleibt die Kamera in zurückgesetzter Position, ist die Tiefeninformation in jedem Fall gleich. Dies gilt sowohl für Normal- als auch für Weitwinkel- und Teleobjektive.

Erst durch das vertikale Verschieben der Kamera wird es ermöglicht, die Entfernung des Kornknechts von der Kamera zu bestimmen. Dazu

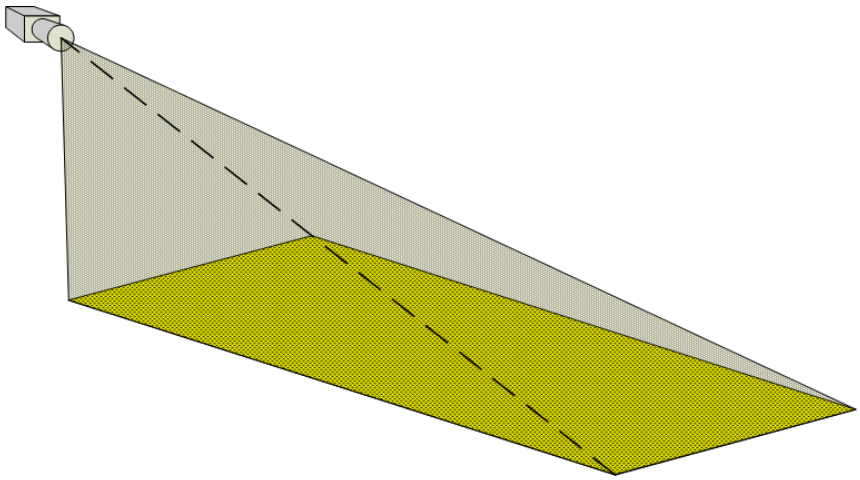

Abbildung 2.7: 100% der Getreidefläche horizontal überwacht

muss die Kamera auf einen bestimmten Punkt angehoben und geneigt werden. Die Neigung der Kamera sollte so erfolgen, dass die optische Achse des Linsensystems die Diagonalen der Getreidefläche schneidet. Jetzt muss die Kamera soweit vertikal nach oben verschoben werden, dass ihr Blickfeld sowohl die Ecke erfasst, in der sie sich befindet, als auch die gegenüberliegende Ecke (vgl. Abb. 2.8). Erst jetzt ist es möglich, die Position eines Lichtpunktes im Getreidesilo in zwei Dimensionen zu bestimmen.

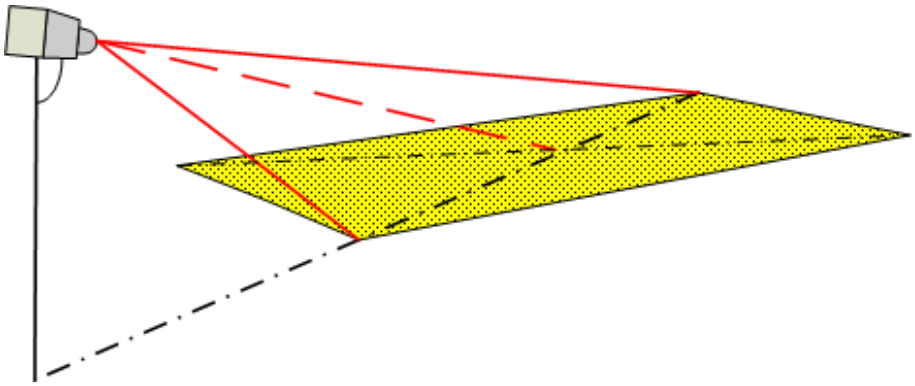

Abbildung 2.8: Positionsbestimmung in zwei Dimensionen

2.3.2 Optische Sensoren zur Positionsbestimmung

Arten und Aufbau von PSDs

In dieser Arbeit werden optische Positionssensoren (OPS), so genannte „Position Sensitive Detectors“ (PSD), für die Triangulation eingesetzt.

Ein PSD ist in der Lage, die ein- oder zweidimensionale Position eines Lichtpunktes zu messen. Während eindimensionale PSDs meist zur Ortsbestimmung eines Lichtpunktes verwendet werden, können zweidimensionale PSDs für die Positionsbestimmung eines Laser-Strahls oder eines Objektes, wie z.B. bei der Verfolgung von Augenbewegungen, eingesetzt werden.

PSDs arbeiten nach zwei verschiedenen Prinzipien. Zum einen gibt es analoge Sensoren mit einer isotropen Sensoroberfläche. Sie liefern kontinuierliche Positionsinformationen. Zum anderen existieren diskrete Sensoren, deren Oberfläche rasterartig strukturiert ist. Dadurch sind sie in der Lage, diskrete Ortsinformationen zu liefern. Ein analoger PSD besteht aus einer monolithischen PIN-Diode [3] (engl. positive intrinsic negative diode) mit einem konstanten Oberflächenwiderstand in einer oder in zwei Dimensionsrichtungen.

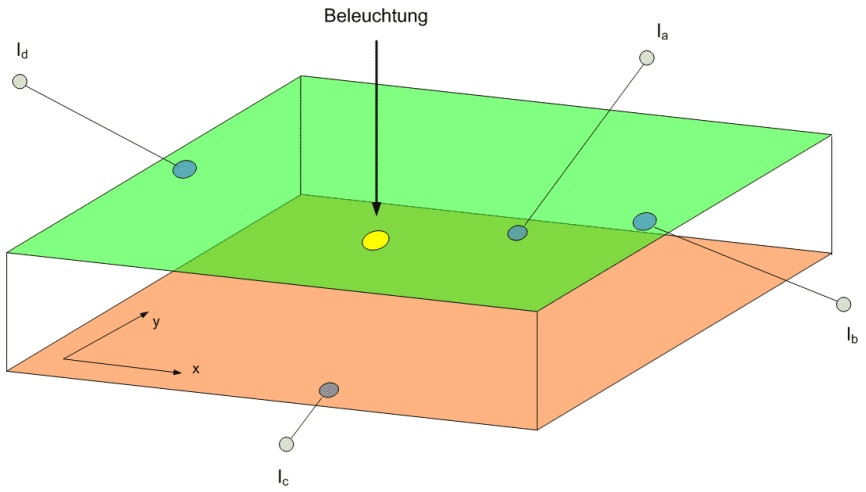

Abbildung 2.9: Prinzipieller Aufbau eines PSD auf Basis einer pin-Diode

[3] Eine pin-Diode ähnelt im Aufbau einer pn-Dioden, jedoch befindet sich zwischen p- und n-Schicht eine i- (intrinsic) Schicht. Die i-Schicht ist schwach dotiert und damit hochohmig. Durch diese Eigenschaft erhöht sich die Lebensdauer der Ladungsträger in der i-Schicht, wodurch sie auch bei kurzen Spannungsimpulsen lange leitend bleibt [13].

Er wird punktförmig belichtet. Der lokale Widerstand und somit auch die Ströme, die über die vier an den Rändern liegenden Elektroden fließen, ändern sich durch den Ort des Lichtpunktes (vgl. Abb. 2.9). Gegenüber diskreten Detektoroberflächen bieten analoge PSDs ein hohes Ortsauflösungsvermögen, eine schnelle Ansprechgeschwindigkeit und eine einfache Ansteuerung. Weiterhin sind die Positionsdaten unabhängig von der Größe des Lichtpunktes auf der Detektoroberfläche. Nachteilig ist das nichtlineare Verhalten der erzeugten Ströme an den Rändern des PSDs.

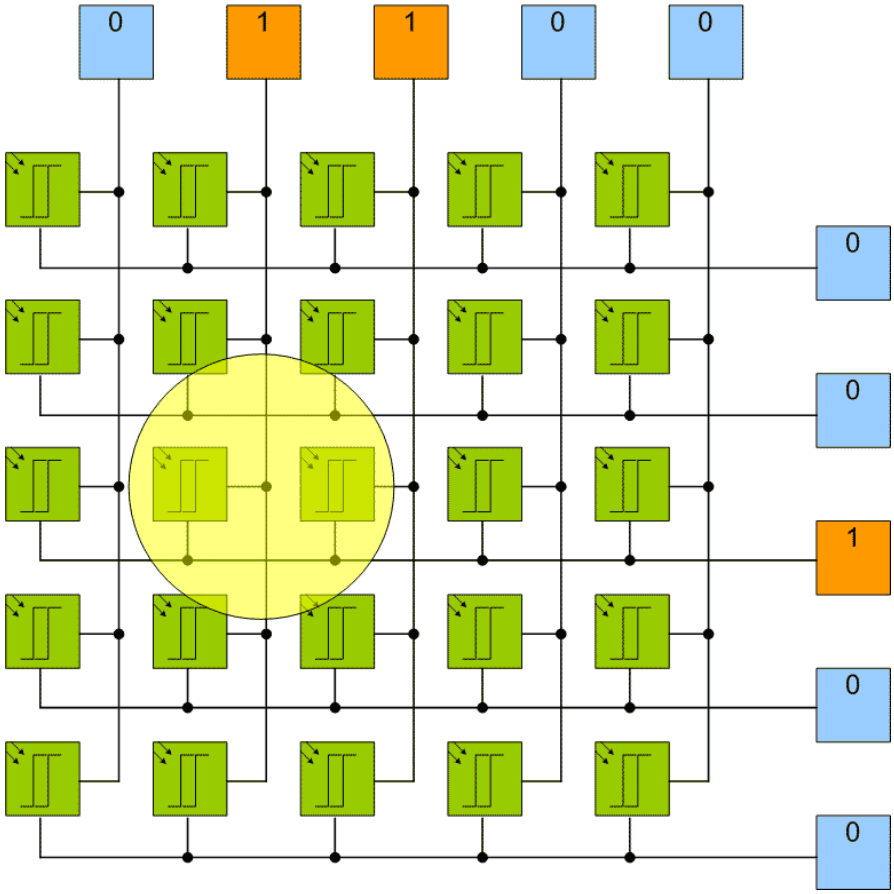

Abbildung 2.10: Diskreter PSD mit paralleler Auswertung

Die zweite Gruppe der PSDs sind die diskreten Sensoren. Ihr lichtsensitiver Bereich ist in Pixel unterteilt. Sie werden in zwei Ausführungen produziert. Während für Messraten unter 1 kHz eine serielle Auswertung der Pixelwerte erfolgt, wurden für schnelle Anwendungen Matrixsensoren mit paralleler Auswertung entwickelt (vgl. Abb. 2.10).

Bei ihnen wird jeder Beleuchtungswert mit einem Schwellwert verglichen und das Vergleichsergebnis mit einem logischen ODER verknüpft. Um den Mittelwert der Koordinaten berechnen und ausgegeben zu können, werden alle Zeilen und Spalten die ein Element heller des Schwellwertes enthalten untersucht.

Technische Daten des verwendeten PSD

Der in dieser Arbeit verwendete PSD des Unternehmens Hamamatsu mit der Kennung S5991-01 ist ein analoger Sensor. Bei ihm handelt sich um einen zweidimensionalen PSD in einem Keramik-Package (vgl. Abb. 2.11). Der S5991-01 gehört in die Gruppe der Pin-Cushion Positionsdetektoren. Die Pin-Cushion-Variante bietet überragende lineare Positionsbestimmung bei großer Ortsauflösung.

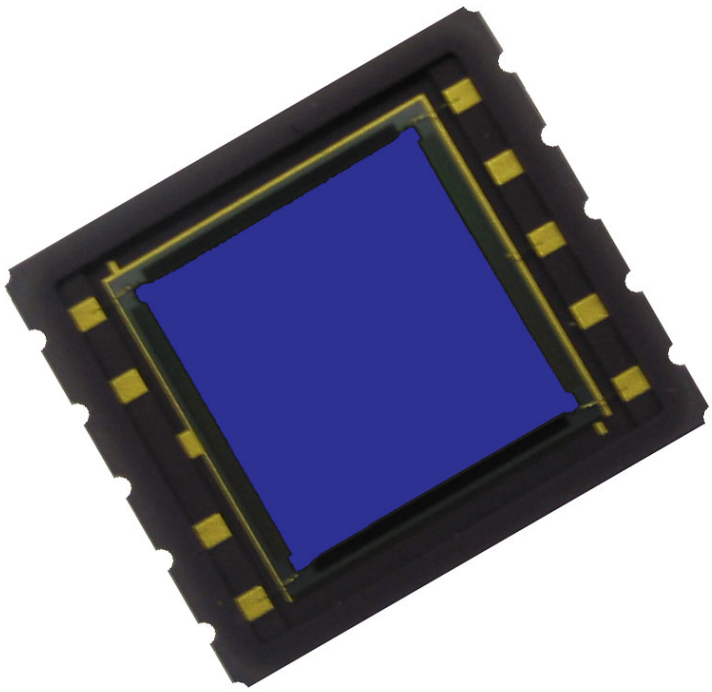

Abbildung 2.11: PSD S5991-01 des Unternehmens Hamamatsu [17]

Er besitzt eine aktive Fläche von 9 x 9mm bei einer Bauhöhe von 1,26mm. Der Bereich der Umgebungstemperatur darf zwischen -20 und +60 Grad Celsius schwanken. Über eine Kathode wird er mit

einer Spannung bis zu 20V mit Energie versorgt. Bei angelegter Spannung und auftreffendem Licht werden vier Ströme emittiert, die eine Ortsbestimmung des auftreffenden Lichtpunktes ermöglichen. Der entstehende Sättigungsphotostrom beträgt $500\mu A$. Die von dem Sensor erfassten Wellenlängen liegen im Bereich zwischen 320 und 1100nm und schließen somit ultraviolettes, sichtbares und infrarotes Licht ein.

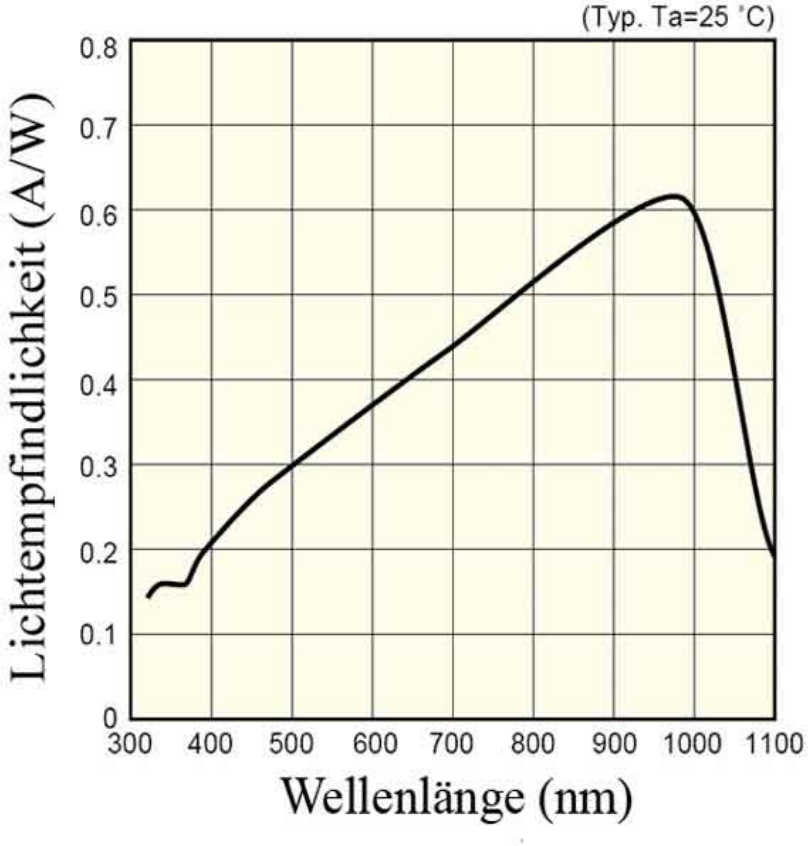

Abbildung 2.12: Lichtempfindlichkeit des PSD 5991-01 in Abhängigkeit von der Wellenlänge [17]

In Abb. 2.12 ist die Lichtempfindlichkeit über der Wellenlänge aufgezeigt. Der Spitzenwert der Lichtempfindlichkeit liegt für den S5991-01 bei 960 nm .

In einem Bereich von 80% von der Mitte des Sensors in seine Ecken ist bei $1\mu A$ Ausgangsstrom und einer Abtastfrequenz von 1kHz eine Positionauflösung von 1,5μm möglich. Hier arbeitet der Sensor linear. Darüberhinaus ist annähernd lineares Verhalten zu erwarten. Der Hersteller empfielt, dass der auftreffende Lichtpunkt eine Größe von

0,2mm nicht unterschreitet.

Auch wenn keine Strahlung auf eine Photodiode auftrifft, kommt es durch Wärmeeinwirkung zur spontanen Bildung von freien Ladungsträgern. Damit fließt ein „Dunkelstrom“ (engl: dark current).

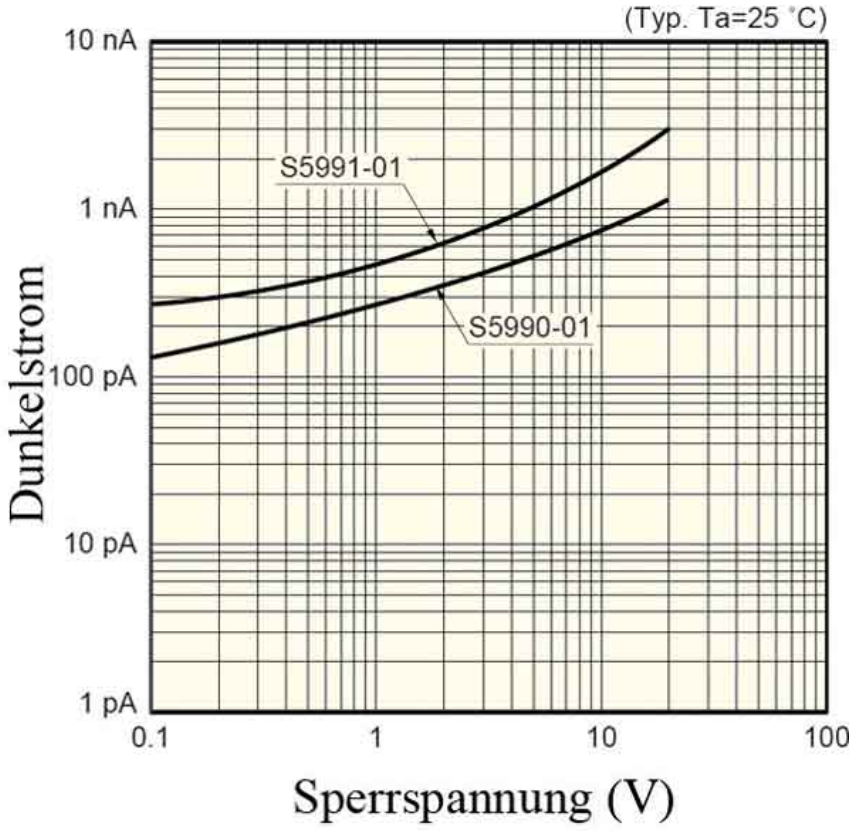

Abbildung 2.13: Auftretender Dunkelstrom im Bereich der möglichen Sperrspannung und gegebener Umgebungstemperatur [17]

In Abb. 2.13 ist das Verhältnis von Dunkelstrom zu angelegter Sperrspannung (engl: reverse voltage) aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass bei Abdunklung des Sensors ein Strom von einigen 100pA bis zu 5nA in Abhängigkeit der angelegten Sperrspannung und der herrschenden Umgebungstemperatur fließt. Wie in Abb. 2.14 dargestellt, liefert der Sensor je zwei Ströme in X- sowie in Y-Richtung. Das Zentrum des Sensors dient dabei als Koordinatenurspung.

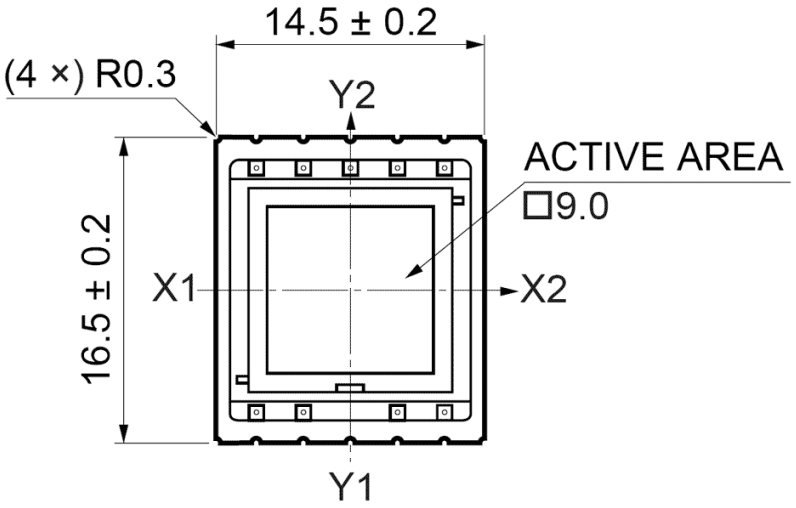

Abbildung 2.14: Schematische Darstellung des S5991-01 [17]

Koordinaten des Lichtpunktes

Da es sich beim S5991-01 um einen zweidimensionalen PSD handelt, müssen sowohl die X- als auch die Y-Koordinaten bestimmt werden. Die Formeln zur Berechnung der Koordinaten des Lichtpunktes auf dem Sensor wurden vom Unternehmen Hamamatsu geliefert. Über die Formeln 2.1 und 2.2 lassen sich die Koordinaten des Lichtpunktes ermitteln. Dabei ist der Wert für "L„ als konstant 10 beim PSD S5991-01 vorgegeben.

$$X = \frac{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \cdot \frac{L}{2} \tag{2.1}$$

$$Y = \frac{(I_2 + I_4) - (I_1 + I_3)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \cdot \frac{L}{2} \tag{2.2}$$

Die Ströme sind dabei den Pins am Sensor wie folgt zugeordnet:

- I_1 entspricht Anode X1
- I_2 entspricht Anode X2
- I_3 entspricht Anode Y1
- I_4 entspricht Anode Y2

2.3.3 Aufgaben der analogen Schaltung

Wie in Abb. 1.6 zu sehen ist, werden die vier vom PSD erzeugten Ströme durch die Schaltung manipuliert, bevor die Positionsdaten durch die Software dargestellt werden können. Welche Schritte müssen gemacht werden, damit aus den Strömen Positionsdaten werden?

In Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke[4] I, welche auf den PSD trifft, wird unterschiedlich viel Strom vom Sensor erzeugt. Die Strom nimmt dabei Werte von 50nA bis zu 500μA an.

Die erste Aufgabe, die die Schaltung übernehmen muss, ist die Umwandlung von Strömen in Spannungen. Je nach erzeugter Spannung muss diese verstärkt werden.

Die zweite Aufgabe ist eine Tiefpassfilterung. Durch diese Filterung wird es möglich, die 50Hz Netzfrequenz sowie weitere Störfrequenzen zu entfernen.

Mit Hilfe von Operationsverstärkern ist es jetzt möglich die Formeln 2.1 und 2.2 nachzubauen. Als letzten Schritt werden die Spannungen für die X- und Y-Koordinaten sowie deren Summe digitalisiert. Die bestimmten Ergebnisse können dann permanent an die Software weitergereicht werden, die eine Positionberechnung und Visualisierung durchführt.

2.3.4 Bewertung des Prototyps

Wie bereits erwähnt, baut diese Diplomarbeit auf erste Erkenntnisse des beschriebene prototypische Versuchsaufbaus auf [26], welcher am Institut für Angewandte Mikroelektronik und Datentechnik der Universität Rostock entwickelt wurde.

Da dieser Prototyp keine zufriedenstellenden Resultate lieferte, hat diese Diplomarbeit die Untersuchung, Weiterentwicklung und Optimierung jeder einzelnen Komponente zum Gegenstand.

[4] Strahlungsflussdichte oder auch Lichtintensität ist die durchschnittliche Energie pro Flächen- und Zeiteinheit. Früher bezeichnete man den Energiefluss pro Flächen- und Zeiteinheit in der Physik als „Intensität“. In der Optik einigte man sich zumindest international, wenn auch noch nicht generell, darauf, diesen Begriff allmählich durch „Bestrahlungsstärke“ zu ersetzen.[27]

Die Situation zu Beginn dieser Diplomarbeit sah wie folgt aus: Im Vorfeld dieser Diplomarbeit wurden verschiedener Komponenten für den Prototyp als geeignet eingestuft. Dazu gehörten z.B. Optik, IF-Filter und PSD. Eine entwickelte analoge Schaltung wurde gefertigt und in ein Industriegehäuse eingebaut. Erste Messungen wurden durchgeführt, lieferten jedoch keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Während der Lokalisierung der Fehler wurde die Schaltung stark mechanisch beeinflusst. Mehrere Kontakte waren durchtrennt oder nachträglich mit Lötbrücken versehen worden. Des Weiteren waren tiefe Kratzspuren auf der Platine zu sehen. So lag die Vermutung nahe, dass die Schaltung ihre ursprüngliche Aufgabe nicht erfüllen konnte.

Trotz erbrachter Vorleistungen war es zu Beginn dieser Arbeit nicht möglich, Stromänderungen an den Ausgängen des PSD, bei unterschiedlichem Lichteinfall, zu messen. Eine Zerlegung des gesamten Prototyps in Segmente wird Aufschluss über die Ursachen des oder der Fehler liefern. Im Verlauf der Arbeit wird ein neuer Prototyp entstehen. Mit ihm wird es möglich sein, die Position einer Lichtquelle zu bestimmen.

3 Indoor Lokalisierung mittels positionssensibler, zweidimensionaler Photodiode

3.1 Überprüfung des Versuchaufbaus

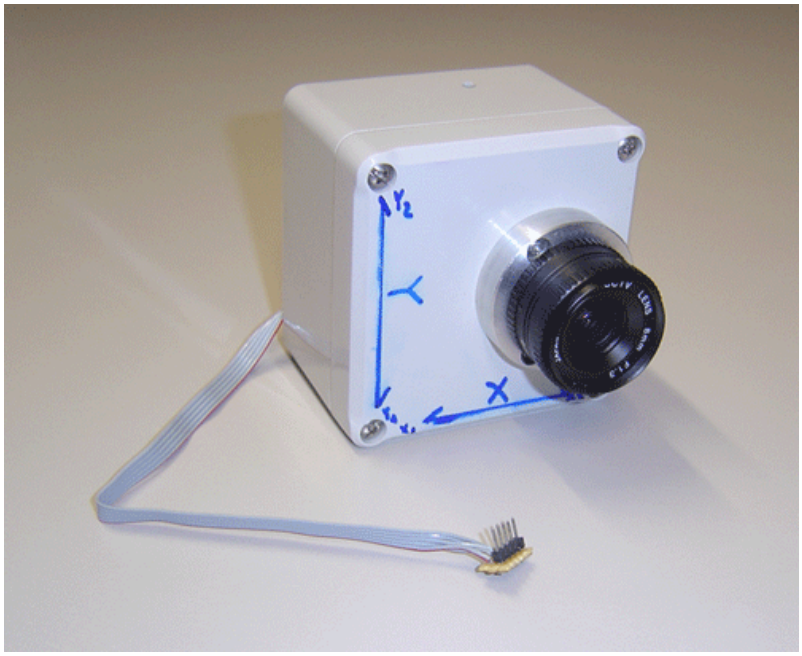

Abbildung 3.1: Industriegehäuse mit Distanzring, Optik und integrierter Schaltung

In diesem Kapitel wird der prototypische Versuchaufbau auf seine Schwachstellen hin experimentell überprüft. Zu Beginn dieser Arbeit war bekannt, dass der vorhandene Versuchsaufbau unzureichend arbeitete. Die genauen Fehler konnten nicht benannt werden. Aus diesem Grund erfolgte zunächst eine Untersuchung der zur Verfügung gestellten Optik und Schaltung samt lichtempfindlichen Sensor.

Wie in Abb. 3.1 zu sehen ist, diente ein Elektronikgehäuse der Firma Bopla als Konstrukt für die Optik und die innen liegende Schaltung. Das Gehäuse schützt vor Feuchtigkeit genauso wie vor Staub und bietet zudem den Vorteil, dass der PSD weitgehend vor Einstrahlung unerwünschter Lichtquellen geschützt ist. Weiterhin wurde ein fünfadriges Flachbandkabel nachträglich mit dem PSD-Sensor verbunden (vgl. Abb. 3.2).

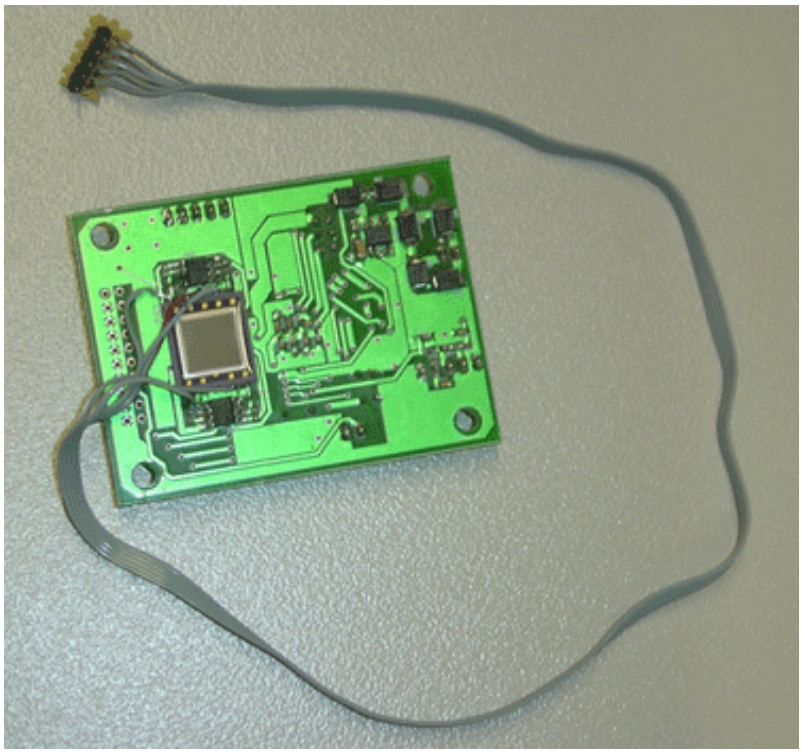

Abbildung 3.2: Schaltung mit PSD und nachträglich angelötetem Flachbandkabel

Für erste Testmessungen wurde ein Laserpointer mit einer Wellenlänge von 650nm verwendet. Er wurde 2,5m von der Optik entfernt in gleicher Höhe platziert. Der Laserpointer wurde auf die Optik ausgerichtet und der Sensor mit einer Spannung von 5,26V versorgt.

Die vier Ausgänge des PSDs wurden mit dem digitalen 4-Kanal-Oszilloskop TDS 2024 des Herstellers Textronix verbunden. Hier sollten die Spannungen der verschiedenen Koordinaten visualisiert werden. Nach dem Start des Versuchs wurde die Optik zunächst in horizontaler Richtung um 90 Grad sowohl im Uhrzeigersinn als auch entgegengesetzt langsam gedreht. Nach der gleichen Herangehensweise wurde die Op-

tik in vertikaler Richtung verschoben. In beiden Fällen konnten keine Unterschiede weder für die X- noch für die Y-Koordinaten oder die Summe festgestellt werden.

Erst als die Optik entfernt und der Versuch wiederholt wurde, konnten minimale Spannungsänderungen an den Ausgängen gemessen werden. Die Vermutung lag nahe, dass die Brennweite der Optik unzureichend auf die Entfernung des Sensors abgestimmt war. Dies galt es zu beweisen und zu korrigieren.

3.1.1 Experimentelle Ermittlung der Brennweite der Optik

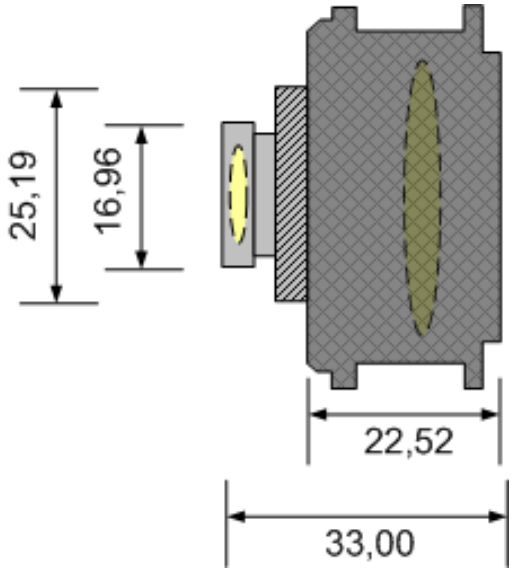

Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der verwendeten Optik

Die verwendete Optik ist in Abb. 3.3 schematisch dargestellt. Laut Herstellerangaben besitzt die Optik eine Brennweite von 8mm. Wie bereits beschrieben muss der Sensor so positioniert werden, dass sich die Sensorfläche in der Brennebene befindet. Die Frage, die sich jedoch stellt, ist: Von welchem Punkt der Optik wird mit dem Messen der Brennweite begonnen, damit der Sensor sich in der Brennebene befindet?

Eine Möglichkeit dies experimentell zu ermitteln ist in Abb. 3.4 schematisch dargestellt. Der Versuch ist wie folgt aufgebaut. Die Optik

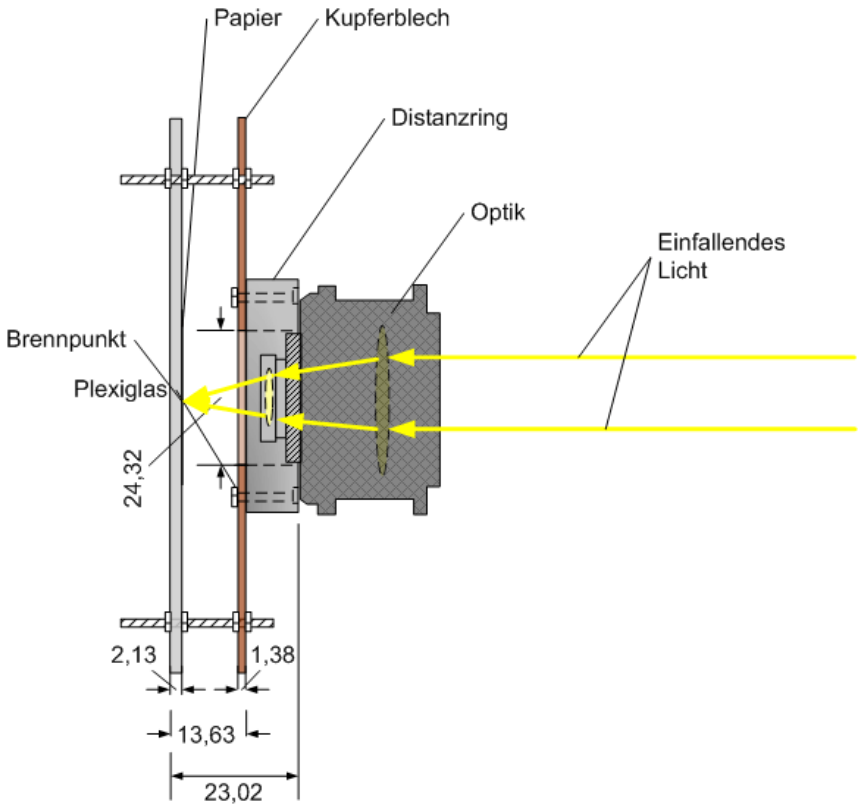

Abbildung 3.4: Experimentelles ermitteln der Brennweite

wird auf einen bereits existierenden Distanzring mit Innengewinde geschraubt. Der Distanzring seinerseits befindet sich auf einem selbst entworfenen Gestell. Dieses Gestell besteht aus einer Trägerplatte für den Distanzring mit Optik und einer Plexiglasscheibe, die über Gewindestangen stufenlos verstellbar ist. Auf der Plexiglasscheibe wird ein weißes Papier befestigt, das als Leinwand für den Lichtpunkt dient.

Die Lichtstrahlen werden durch die Optik gebündelt und auf die Papierfläche projiziert. Vor oder hinter dem Brennpunkt weitet sich der Lichtpunkt auf. Befindet sich das Papier auf der Plexiglasscheibe im Brennpunkt der Optik, ist der Lichtpunkt minimal. Jetzt kann die Optik entfernt und der Abstand zwischen Papier und Widerlager der Optik (Oberseite des Distanzringes) gemessen werden.

3.1.2 Nachjustierung der Platine

Ein Blick in die Kamera bei entfernter Optik zeigte, dass der Koordinatenursprung des PSD augenscheinlich nicht auf der optischen Achse des Linsensystems lag.

Strommessungen an den Ausgängen des PSDs sollten Aufschluss über die Fehlstellung geben. Der Laserpunkt wurde durch die Optik fokussiert. Die verschiedenen Messungen lagen entlang der Abszisse und Ordinate sowie in den Ecken des PSDs. Die PSD Ausgangsströme wurden gemessen und die errechneten X- und Y- Koordinaten in die Tabelle 3.1 aufgenommen.

Anhand dieser Werte ist eine deutliche Fehlstellung der Platine sowohl in X- als auch in Y-Richtung zu sehen. Mit einem Multidremel wurden die vorgefertigten Bohrungen der Platine soweit ausgefräst, bis sich der Koordinatenursprung des PSD auf der optischen Achse befand. Abschließend wurden die eben beschriebenen Messungen wiederholt. Die Auswertung der aufgenommenen Messwerte ist in Abb. 3.16 dargestellt.

3.1.3 Untersuchung und Vergleich der vorhandenen Schaltung mit der Schaltung des C9069 Hamamatsu Referenzboards

Die entwickelte Schaltung lag, neben der defekten Platine, noch als PDF-Schematic vor. Dieses Schematic ist in Abb. 3.5 zu sehen. Zur besseren Veranschaulichung wurden die verschiedenen Baugruppen farblich hinterlegt.

Kernstück der Schaltung ist der PSD. Die vier von ihm erzeugten Eingangsströme I_e werden mit Hilfe eines Strom-/Spannungs-Wandlers in proportionale Spannung U_a gewandelt (grünlich unterlegt). Als nächstes werden die Spannungen tiefpassgefiltert (hier rotbraun unterlegt). Ein Tiefpassfilter schwächt die hohen Frequenzen bis zu einer Grenzfrequenz und lässt alle tieferen Frequenzen praktisch ohne Abschwächung passieren. In diesem Fall sollten vorwiegend die 50Hz Netzfrequenz und weitere hochfrequente Störungen gedämpft werden.

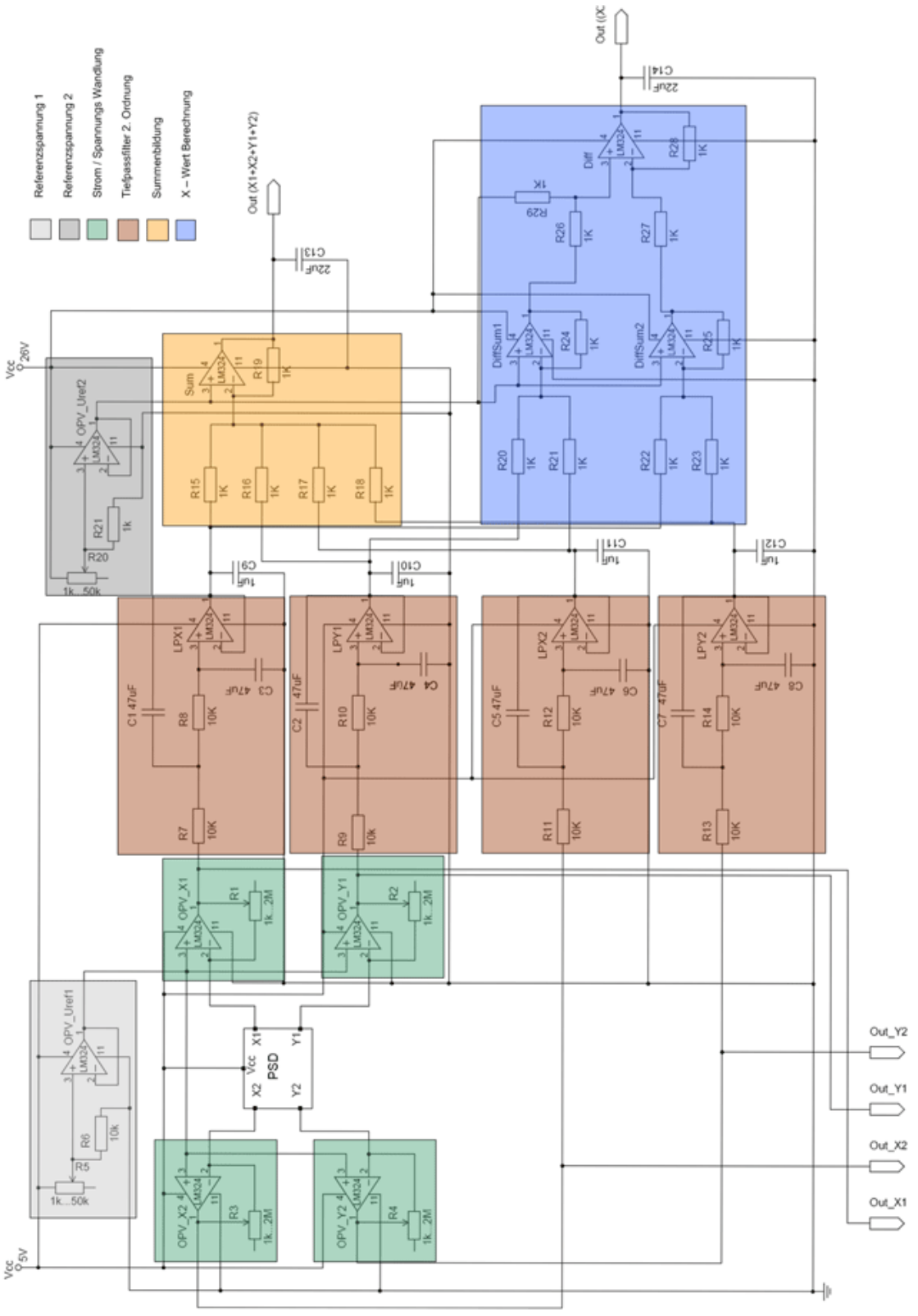

Abbildung 3.5: Schaltplanentwurf des Prototyps

Bei dem hier vorgestellten Tiefpass handelt es sich um einen aktiven Tiefpass 2. Ordnung mit einer oberen Grenzfrequenz von $\frac{1}{R*C} \approx 2,13Hz$. Im Anschluss erfolgt die Berechnung der Summe und des Zählers der X-Koordinate auf analoge Weise.

Nach Herstellerangaben berechnet sich die X-Koordinate wie in Formel 2.1 dargestellt. Der orange unterlegte Bereich kennzeichnet die Summe und damit den Nenner von Formel 2.1. Hier werden alle vier Spannungen addiert. Der Nenner kann in Abhängigkeit der einfallenden Lichtmenge als Normierungswert betrachtet werden.

Der blau unterlegte Bereich stellt den Zähler für die X-Koordinate dar. In der ersten Stufe werden hier zunächst die PSD Ausgänge X2 + Y1 und dann die PSD Ausgänge X1 + Y2 addiert. Im Anschluss wird der zweite Summand vom ersten subtrahiert.

Eine analoge Vorgehensweise wäre für die Y-Koordinate denkbar gewesen, wurde hier jedoch nicht dargestellt. Weiterhin fehlt für die vollständige Lösung die Analogdivision. Sie kann auf die Multiplikation zurückgeführt werden und ist im Buch „ Halbleiterschaltungstechnik“ von Tietze und Schenk[25] dargestellt.

Des Weiteren werden zwei Referenzspannugen OPV_Uref1 und OPV_ Uref2 benutzt (gräulich hinterlegt). Während OPV_Uref1 für die Verstärkung der Strom-/Spannungs-Wandlung eingesetzt wird, wird OPV _Uref2 bei der Berechnung des Nenners und des Zählers der Koordinaten verwendet.

Während dieser Diplomarbeit wurde vom Institut für Angewandte Mikroelektronik und Datentechnik ein Referenzboard vom Sensorhersteller erworben. Das Board vom Typ C9069 sollte für vergleichende Messungen zur Verfügung stehen.

Im Benutzerhandbuch des C9069 findet sich ein Blockschaltbild mit dem Aufbau des Boards (vgl. Abb. 3.6). Es wird mit einer Gleichspannung von 12V betrieben.

In der linken oberen Ecke des Blockschaltbildes finden sich die PSD-Ausgangsleitungen. Gleich der analogen Schaltung des Prototyps erfolgt zunächst eine Strom-/Spannungs-Wandlung mit gleichzeitiger

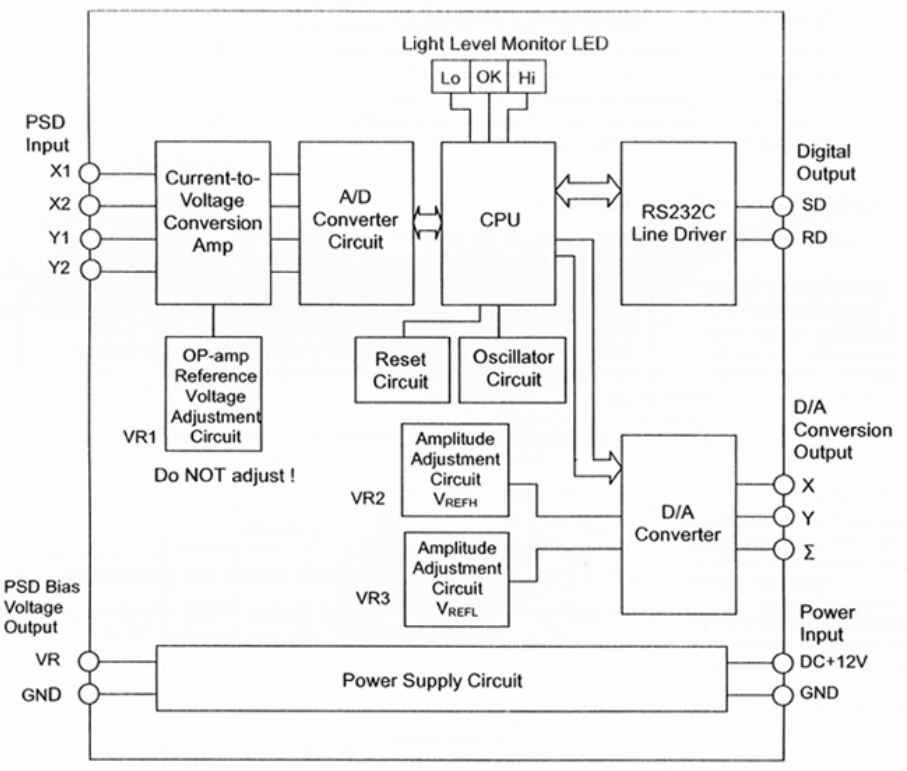

Abbildung 3.6: Blockschaltbild des Referenzboards C9069 von Hamamatsu[16]

Verstärkung. Ein Mikrokontroller mit Analog-/Digital-Wandler (A/D) wandelt zunächst die Spannungen in digitale Werte und berechnet im Anschluss die Koordinaten für den X- bzw. Y-Wert. Die auftreffende Lichtmenge wird über verschieden leuchtende LEDs signalisiert. Die berechneten digitalen Koordinaten werden über die serielle RS232 Schnittstelle an die Software weitergeleitet. Sie stellt die Position des Lichtpunktes auf dem PSD und die Spannungen für den X- und Y-Wert bzw. die Lichtintensität dar.

Im Benutzerhandbuch zum C9069 wird deutlich daraufhingewiesen, dass keine Filterung des Umgebungslichtes stattfindet. Bei der existierenden Schaltung erfolgte ebenfalls keine Filterung des Umgebungslichtes. Vielmehr verfügt die bereitgestellte Schaltung über einen Tiefpassfilter, der wiederum auf dem C9069 Hamamatsu Board fehlt.

Nachdem beide Schaltungen in Bezug auf ihre Komponenten verglichen wurden, kann schrittweise die analoge Schaltung des Prototyps nachgebaut und auf ihre Funktionsweise getestet werden.

Ein praktischer Weg analoge oder digitale Schaltung oder auch nur Schaltungssegmente aufzubauen, bietet die Nutzung von Steckplatinen (auch Experimentierplatinen oder Steckbretter genannt). Sie ermöglichen einen schnellen und flexiblen Aufbau einer Schaltung, ohne zu löten. Die Verdrahtung erfolgt dabei mit flexiblen Testkabeln.

Neben dem PSD sind Operationsverstärker (OPV) für die gegebene Schaltung von wesentlicher Bedeutung.

OPVs sind sehr hochwertige Gleichspannungsverstärker mit besonderen Eigenschaften. Sie werden auch als Rechenverstärker oder Differenzverstärker bezeichnet und wurden für die Analogrechentechnik und für besondere Anwendungen in der Regelungstechnik konstruiert. Das ursprüngliche Aufgabengebiet der Operationsverstärker war die Durchführung mathematischer und regelungstechnischer Operationen.

Heute werden sie überwiegend als monolitische integrierte Schaltungen gefertigt. Durch große Stückzahlen verringerte sich der Herstellungspreis und neue Anwendungsgebiete konnten erschlossen werden [10].

Ein Operationsverstärker ist weitgehend symmetrisch aufgebaut und besteht praktisch aus zwei Verstärkern, die auf einen gemeinsamen Ausgang arbeiten (vgl. Abb. 3.7). Jeder dieser Verstärker hat einen eigenen Eingang. Die Spannungsdifferenz zwischen beiden Eingängen kann verstärkt werden.

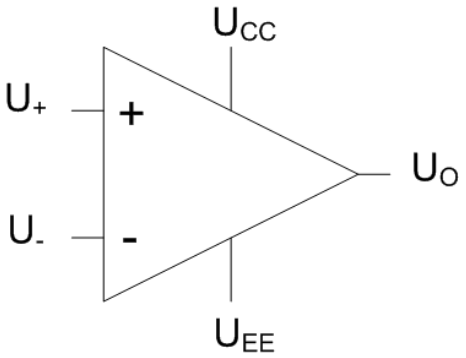

Abbildung 3.7: Schaltzeichen für Operationsverstärker

Alle Spannungen sind auf einen gemeinsamen Pol, z.B. die Masse, bezogen, der im Schaltzeichen nicht dargestellt ist. Der Eingang U_- wird invertierender oder auch N-Eingang genannt. Die an diesen Eingang

angelegt Spannung erscheint am Ausgang um 180 Grad verschoben, wenn es sich um eine sinusförmige Spannung handelt.

Der zweite Eingang U_+ wird nichtinvertierender, Normaleingang oder auch P-Eingang genannt. Eine hier angelegte Spannung erscheint am Ausgang mit gleicher Polung bzw. mit gleicher Phasenlage. Ein OPV benötigt zwei gegenüber dem Bezugspol symmetrische Speisespannungen, z.B. +10V gegen Masse und -10V gegen Masse.

Ein idealer Operationsverstärker hätte eine Verstärkung $V = \infty$, Eingangswiderstände $R_e = \infty\Omega$, einen Ausgangswiderstand $R_a = 0\Omega$, eine Gleichtaktverstärkung $V_{Gl} = 0$ und einen Frequenzbereich von 0 bis ∞Hz.

Ideale OPVs können jedoch nicht gebaut werden. Stattdessen haben reale OPVs Verstärkung ca. $V \cong 1000000$, Eingangswiderstände R_e zwischen 1MΩ und 1GΩ , einen Ausgangswiderstand R_a ca. 10Ω , eine Gleichtaktverstärkung $V_{Gl} \cong 0,2$ und einen Frequenzbereich von 0 bis $\cong$ 100MHz [12].

Der in der Schaltung verwendete Operationsverstärker gehört in die Serie LM324. Dabei handelt es sich, wie in Abb. 3.8 zu sehen, um ein Package bestehend aus vier OPVs. Sie besitzen je zwei echte differentielle Eingänge. Der Ausgang ist bei jedem OPV gegen Kurzschluss geschützt. Weiterhin besitzen alle eine gemeinsame Masse und eine gemeinsame Versorgungsspannung. Diese liegt zwischen 3V und 32V.

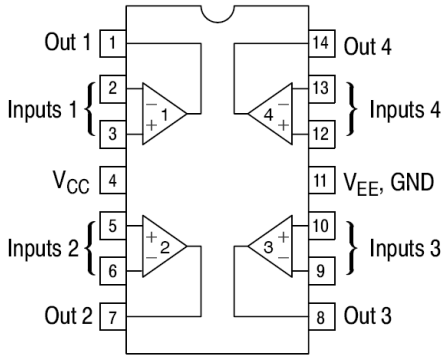

Abbildung 3.8: Aufbau des OPV Package LM324 [[15]]

Die Referenzspannung OPV_Ref1 wurde nachgebaut und getestet. Die anliegenden Signale an den vier Ausgängen des PSD konnten eben-

falls erfolgreich Strom/Spannungs gewandelt werden. Dabei wurde zunächst ein fester 10KΩ-Widerstand in die Rückkopplung des OPV eingebaut.

Eine Strom-/Spannungs-Schaltung besitzt einen niedrigen (differentiellen) Eingangswiderstand und wird häufig zur Verstärkung von Signalen aus Stromquellen verwendet [21]. Mit den Widerständen R1 bis R4 als Proportionalitätsfaktoren lässt sich das Verhältnis von Eingangsstrom zu Ausgangspannung einstellen (vgl. Abb. 3.5).

Die Tiefpass Stufe wurde ebenfalls aufgebaut und im Zusammenhang mit den bereits bestehenden Komponenten getestet. Dazu wurden die Ausgangsspannungen der 4 Tiefpässe mittels Messspitzen aufgenommen und gemeinsam am Oszilloskop TDS 2024 dargestellt. Das Umpositionieren des Lasers spiegelte sich durch Spannungsänderungen am Oszilloskop wieder.

Um die zweite Referentzspannung erzeugen zu können, wurden zwei Labornetzteile in Reihe geschaltet. Auch der Zähler der X-Koordinate und die Summe (in Abb. 3.5 blau und orange unterlegt) konnten aufgebaut und erfolgreich getestet werden. Weil die Testmessungen erfolgreich verliefen, konnte daran gedacht werden, die auf dem Steckbrett aufgebaute Schaltung auf eine Lochplatine zu löten.

Da aber einige Teile der Strom-/Spannungs-Wandlung und die Tiefpassfilterung in dieser Schaltungsvariante vierfach ausgelegt waren, musste darauf geachtet werden, den systematischen Fehler zu minimieren. Bauteilbedingte Toleranzen im Bereich von ±10% können die Werte vom PSD stark verfälschen. Aus diesem Grund wurden die Widerstände und die OPVs ausgemessen und aufeinander abgeglichen. Während das Ausmessen der Widerstände problemlos mit einem Multimeter realisiert werden konnte, gestaltete sich der Abgleich der OPVs aufwendiger.

Eine Strom-/Spannungs-Wandlung diente als Grundlage um die OPVs auszumessen. Ein LM324-Baustein wurde auf eine Experimentierplatine gesteckt und an Spannung und Masse angeschlossen. Für den Koppelwiderstand wurde immer der selbe 9,9kΩ Widerstand verwendet. Die vier Ausgänge des PSD wurden nacheinander an den ersten

OPV angeschlossen und die Spannugen gemessen.

Dann wurde die Messung mit den drei verbleibenden OPVs des LM324 wiederholt. Auch hier wurden die Spannungen gemessen. Insgesamt wurden drei LM324-Bausteine erfolgreich vermessen. Für die gesamte Dauer des Versuchs wurde die Kamera und der Laser fixiert und nicht verändert.

Tabelle 3.3 enthält die aufgenommenen Werte des Versuches. Neben der Messstrecke auf der Experimentierplatine wurde die Komponente für die Berechnung des Zählers der Y-Koordinate auf eine Lochplatine gelötet.

Dabei wurde darauf geachtet, dass Baugruppen wie z.B. die Strom-/Spannungs-Wandlung oder die Tiefpassfilterung den selben LM324-Baustein benutzen. Damit wurde der auftretende systematische Fehler weitgehend minimiert.

Im Hinblick auf eine spätere Digitalisierung der Spannungen wurde die zweite Referenzspannung auf einen Wert von 1,65V gesetzt und entsprach damit der halben Spannung die der im Anschluss geschaltete A-/D-Konverter wandeln konnte.

Die fertig aufgelötete Schaltung ist in Abb. 3.9 zu sehen. Nachdem die gesamte Schaltung aufgebaut war, wurde das Laserlicht aus verschiedenen Richtungen auf die Optik gelenkt. Je eine Messspitze befand sich am Ausgang eines Tiefpassfilters. Die am Oszilloskop angezeigten Spannungen zeigten eine deutliche Änderung beim Lichteinfall aus unterschiedlichen Richtungen. Die ermittelten Werte lagen zwischen 1,35 und 3,24V.

3.2 Experimentelle Ermittlung des Öffnungswinkels der Optik

Die fertige analogen Schaltung sollte benutzt werden um den Öffnungswinkel der Optik zu ermitteln. Dazu wurde im Labor ein Versuch durchgeführt, der es ermöglichte, den Öffnungswinkel der Optik zu bestimmen.

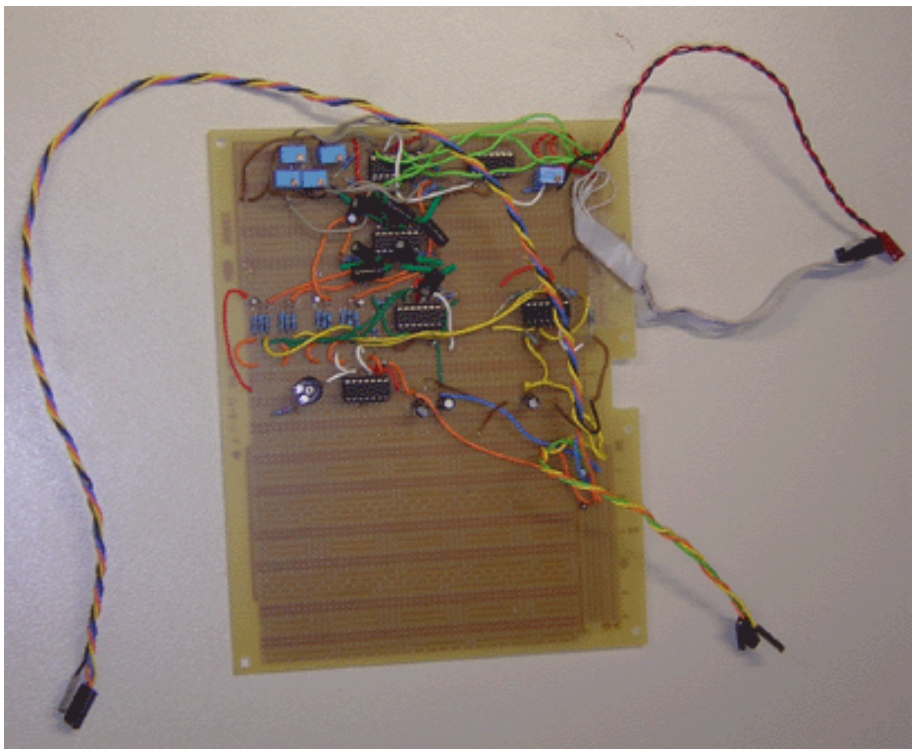

Abbildung 3.9: Aufbau der analogen Schaltung nach Referenzschaltung des Prototyps

Um Störeinflüsse durch Einstrahlung natürlicher oder künstlicher Lichtquellen zu minimieren, wurde der Versuch bei Dunkelheit durchgeführt. Als Lichtquelle für die Winkelmessung wurde erneut der Laser genutzt. Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abb. 3.10 dargestellt.

Sowohl die Ankathete als auch der rechte Winkel zur Gegenkathete können als unveränderliche Größen angesehen werden. Auf der Gegenkathete wurde der Laser solange verschoben, bis die Optik den Lichtpunkt erfassen konnte. Die Länge der Gegenkathete wurde für beide X-als auch für beide Y-Koordinaten aufgenommen. Mit Hilfe des Sinussatzes lies sich dann der Winkel α berechnen.

Wie bereits erwähnt bietet der Laser keine zufriedenstellende Lösung bei der Ortung des „Kornknechts“ im Getreidelager. Es muss eher an eine ebenfalls starke Lichtquelle gedacht werden, die jedoch weniger gerichtet die Photonen abstrahlt.

Aus diesem Grund wurden die Messung mit einem Baustrahler als Lichtquelle durchgeführt. Der Baustrahler besaß eine Leistungsauf-

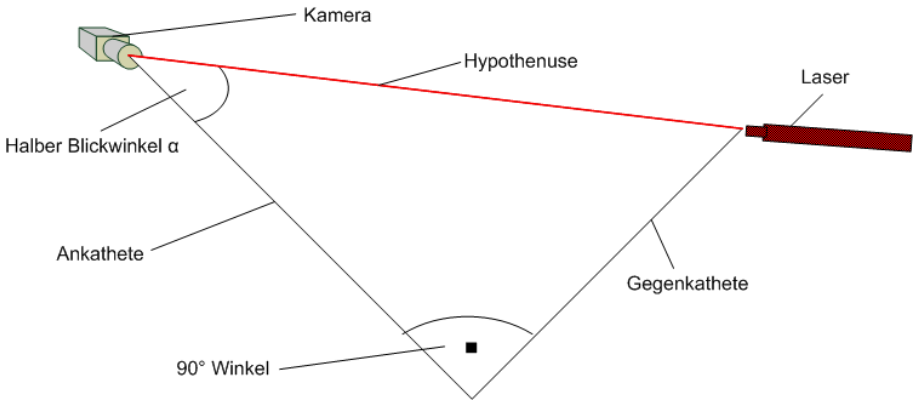

Abbildung 3.10: Bestimmung des halben Blickwinkels der Optik

nahme von 300W und wurde im Blickfeld der Kamera im Abstand von 2m positioniert.

Die Lampe konnte jedoch nicht von der Kamera erfasst werden. Auch das seitliche Verschieben der Lichtquelle vor der Kamera erbrachte keine unterschiedlichen Messergebnisse. Erst als der Scheinwerfer bis auf 109cm an die Erfassungseinheit herangebracht wurde, konnten Unterschiede in der Stromabgabe des PSD festgestellt werden.

Aus diesem Grund wurden die 10kΩ Koppelwiderstände der Strom-/Spannungs-Wandlung durch Potentiometer mit Widerständen bis 4,7 MΩ ersetzt. Damit wurde eine wesentlich größere Verstärkung der Strom-/Spanunngs-Wandlung erreicht.

3.3 Messungen mit einem IR Filter

Wie bereits erwähnt, kann das auftreffende Licht mittels Filter in einen bestimmten Wellenbereich selektiert werden. Eine Minderung von Störeinflüssen wäre die Folge.

Weil der verwendete PSD bei 960nm besonders sensitiv ist, wäre es sinnvoll, einen solchen Filter zu verwenden. Für Testzwecke wurde ein Filter, welcher eine Wellenlänge von 850nm hindurchlässt, zur Verfügung gestellt (vgl. Abb. 3.11).

Versuche mit der Laserquelle ergaben, dass keine Unterschiede in der Stromabgabe des PSD zu verzeichnen waren. Erst als das Laserlicht

durch den 300W starken Bauscheinwerfer ersetzt wurde, konnten unterschiedliche Spannungen an den PSD Ausgängen erkannt werden.

Abbildung 3.11: IR Filter für Beschränkung der Wellenlängen

3.4 Messungen im Gebäude

Die Ergebenisse der Messungen im Gebäude sollten nicht in Form von Ausgangsspannungen aufgenommen werden. Ziel sollte es sein, die Spannungen zu digitalisieren. Ein A-/D-Wandler erledigt diese Aufgabe. Da keine A-/D-Wandler als separater Baustein zur Verfügung stand, wurde auf ein Mikrokontrollerboard von ChipCon zurückgegriffen.

Die wichtigsten Eigenschaften dieses Boards sind, dass es einen 8051 kompatiblen Mikrokontroller, einen 3-Kanal-A-/D-Wandler und einen Low-Power-RF-Transceiver enthält. Zunächst ist hauptsächlich der relativ leicht zu programmierende 8051 Mikrokontroller und der 10-Bit breite 3-Kanal-A-/D-Wandler von Bedeutung. Die RF-Einheit bietet für spätere Anwendungen die Möglichkeit der Funkübertragung der digitalisierten Daten.

Für die Messungen im Labor und auch für folgende Positionsmessungen im Gebäude wurde das ChipCon Board über eine RS232-Schnittstelle mit einem Notebook verbunden. Die Messungen wurde in einem ca. 40m langen und 2,75m breiten Verbindungsgang in der Richard Wagner Str. 31 in Rostock-Warnemünde durchgeführt.

Das gesamte Blickfeld der Kamera sollte während des Versuchs vermessen werden. Deshalb wurde vor Versuchsbeginn eine A1 große Zeichnung erstellt. Die Zeichnung war wie ein Winkelmesser aufgebaut und enthielt Strahlengänge von -25 Grad über 0 Grad bis +25 Grad. Die Strahlen wurden in Abständen von 5 Grad angeordnet. Diese Zeichnung wurde auf einem Gerätewagen fixiert und diente in Verbindung mit dem Laserentfernungsmesser Leica DISTO^{TM} A5[1] dafür, dass immer unter einem konstanten Winkel und exakten Abständen zwischen Lichtquelle und Kamera gemessen werden konnte (vgl. Abb. 3.12).

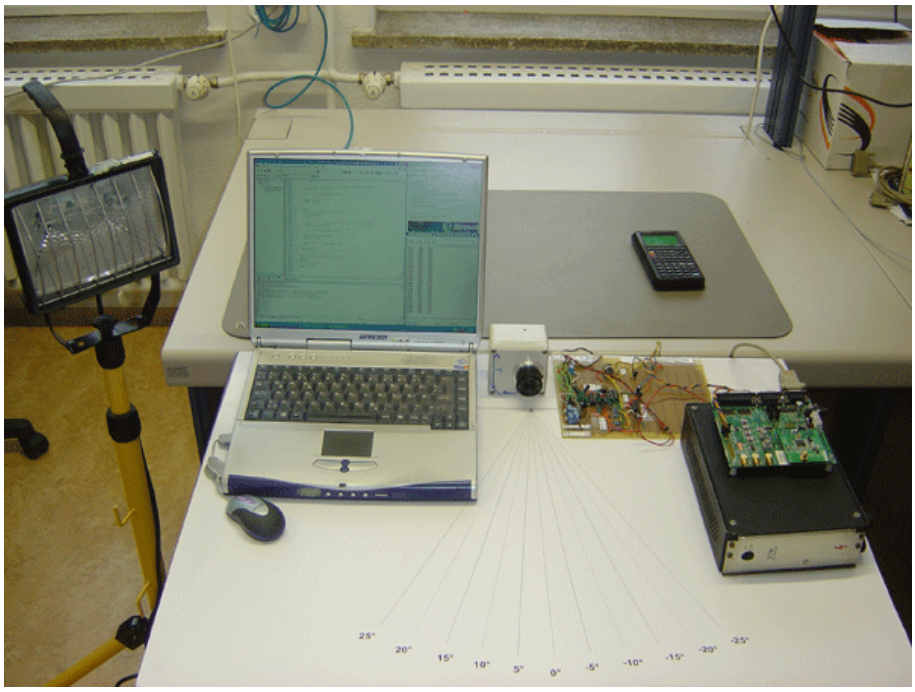

Abbildung 3.12: Versuchsaufbau für die Messung im Gebäude

Die Kamera wurde direkt über dem Laserentfernungsmesser fixiert und blickte in die entsprechende Richtung.Gemessen wurden die Zähler der X- und Y-Koordinaten sowie die Spannung der Summe. Die digitalisierten Werte konnten in einer Hypertermverbindung auf einem Notebook dargestellt werden. Als Lichtquelle diente der bereits erwähnte Baustrahler. Seine Leistungsaufnahme wurde auf 500W er-

[1]Das Leica DISTO^{TM} A5 Laserentfernungsmessgerät ist in der Lage Entfernungen bis 100m auf 1mm genau zu bestimmen. Weiterhin können Teilstrecken berechnet, Flächen in m^2 oder ft^2 sowie Volumen in m^3 oder ft^3 ermittelt werden.

höht. Abb. 3.12 zeigt den gesamten Versuchsaufbau für diese Messreihe.

Die erste Messreihe wurde bei Dunkelheit unter folgenden Bedingungen aufgenommen: Lampe und Kamera befanden sich in gleicher Höhe. Die Lampe wurde direkt vor die Kamera gestellt und anschließend auf der 0 Grad Achse in 5m Abständen rückwärts bewegt. Der Koppelwiderstand der Strom-/Spannungs-Wandlung sollte 280kΩ betragen. Dies gelang jedoch durch die Potentiometereigenschaften nur bedingt. Die Werte schankten zwischen 277 und 295kΩ.

Die Messreihe wurde in ähnlicher Form ein zweites Mal wiederholt. Unter gleichen Bedingungen und bei gleichen Einstellungen wie beim ersten Mal wurde jetzt nur die Lampenhöhe verändert, sodass ein Höhenunterschied zwischen Lampe und Kamera von 107,5cm entstand. Tabelle 3.5 zeigt die dabei aufgenommenen Messwerte für X, Y sowie die Summe. Die Messungen wurden erneut bis zu einer Entfernung von 40m durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.6 dargestellt.

Messungen, bei denen das Licht aus unterschiedlichen Richtungen auf die Optik trifft, komplettierten die erste Messreihe im Gebäude. Die Kamera blieb während des gesamten Versuches unverändert und blickte entlang des 0 Grad Winkels. Während sich die optische Achse in einer Höhe von 84,5cm befand, hatte die Lichtquelle eine Höhe von 157cm. Die entstehende Höhendifferenz von 72,5cm sollte zusätzliche Informationen über die Entfernung der Lichtquelle zur Kamera liefern.

Die Koppelwiderstände der Strom-/Spannungs-Wandlung blieben unverändert bei Werten um 280KΩ eingestellt. Die Messungen erfolgten in 5 Grad Abständen. Zu jedem Winkel wurden mehrere Werte aufgenommen. Dabei wurde die Lichtquelle entlang des Strahls des Laserentfernungsmessers verschoben.

Bedingt durch die Breite des Zwischenganges konnten nicht gleich viele Messungen für jeden Winkel durchgeführt werden. Während für die größten Winkel von ±25 Grad nur vier Messungen aufgenommen werden konnten, wurden bei kleineren Winkeln bis acht Messungen bei einer Entfernung von 7m durchgeführt.

Zu Vergleichszwecken wurden Messungen unter Einfluss von Tageslicht

durchgeführt. Bei einer Höhendifferenz von 72,5cm zwischen optischer Achse und Lichtquelle wurde über den gesamten Öffnungswinkel der Optik gemessen. Als Lichtquelle diente der 500W Baustrahler. Es wurden sowohl die X- als auch Y-Koordinate vermessen.

Als Referenzlichtquelle zum Baustrahler wurden Messungen mit dem 650nm Laser durchgeführt. Die Aufnahme der Messreihe erfolgte bei Dunkelheit. Die Y-Koordinate wurde über den gesamten Öffnungswinkel vermessen. Lichtquelle und Optik befanden sich in gleicher Höhe.

Ebenfalls zu Vergleichszwecken wurde die oben beschriebene Optik gegen eine lichtstärkere Optik getauscht. Bei geöffneter Blende sind deutliche Unterschiede in der Linsengrößen zu erkennen (vgl. Abb. 3.13). Die Y-Koordinate wurde über einen 20 Grad Öffnungswinkel in 2,5 Grad Abständen vermessen. Der Höhenunterschied zwischen Lichtquelle und Optik betrug 45,5cm, wobei die Rückkopplung der Strom-/Spannungs-Wandlung unverändert bei 280kΩ eingestellt blieb.

Abbildung 3.13: Linsenvergleich der verwendeten Objektive

Bei maximaler Verstärkung von 540kΩ während der Strom/Spannungs-Wandlung wurden Distanzmessungen durchgeführt. Dabei sollte die größtmögliche Entfernung zwischen Lichtquelle und Optik ermittelt werden. Die Messungen wurden bei Dunkelheit mit dem lichtschwächerin Objektiv durchgeführt. Als Lichtquellen dienten der 650nm Laser und der 500W Baustrahler. Die Messungen mit dem Baustrahler als Lichtquelle wurden sowohl mir als auch ohne IR-Filter durchgeführt.

3.5 Auswertung der Ergebnisse

Im vorangegangenen Teil dieser Arbeit wurde der bereitgestellte Prototyp bewertet. Daraufhin wurde ein neuer Prototyp entworfen und gebaut. Mit ihm wurden Messungen durchgeführt. Im folgenden Abschnitt der Arbeit werden die Ergebnisse der Messungen ausgewertet.

3.5.1 Auswertung des prototypischen Aufbaus

Bewertung des Prototyps

Der erste Schritt bei der Überprüfung des prototypischen Versuchsaufbaus bestand in einer visuellen Begutachtung der gegebenen Bauteile. Dabei konnte festgestellt werden, dass die für den Prototyp entwickelte Schaltung massiv physisch belastet wurde. Unter anderem wurden einige Pins der OPV Bausteine von der Platine gelöst bzw. zusätzlich miteinander verlötet. Ein tiefer Kratzer quer über die Platine ließ vermuten, dass die Platine durch die Beschädigungen nicht mehr für die ursprünglich entwickelte Aufgabe eingesetzt werden konnte. Die Vermutung konnte durch den bisherigen Bearbeiter des Themas sowie durch eigene Messversuche bestätigt werden.

Die ersten Messversuche erfolgten, nachdem die Platine in das Bopla Elektronikgehäuse eingebaut wurde. Die Platine diente lediglich als Träger für den otischen Sensor. Laserlicht wurde durch eine Optik weiter gebündelt und auf den optischen Sensor fokussiert. Das Licht fiel über einen horizonatalen und vertikalen Blickwinkel von 90 Grad ein.

Als Messergebnis konnte weder eine Strom- noch Spannungsänderung an den Ausgängen des PSD festgestellt werden. Obwohl der tatsächliche Blickwinkel der Optik nicht bekannt war, konnte davon ausgegangen werden, dass bei Lichteinfall nahe der optischen Achse Unterschiede im Stromfluss bzw. in der abfallenden Spannung messbar gewesen sein müssten. Erst als die Optik entfernt wurde, konnte das Experiment erfolgreich wiederholt werden. Dies legte die Vermutung nahe, dass der Sensor sich nicht in der Brennebene befand. In diesem Fall

würde das eintreffende Licht in der Brennebene fokussiert werden, sich jedoch bis zum PSD wieder soweit aufweiten, dass der Sensor permanent gleichmäßig beleuchtet werden würde. Die Folge wäre, dass unabhängig vom Winkel des auftreffenden Lichtes eine konstante Spannung und damit auch ein konstanter Stromfluss an den Ausgängen messbar wäre.

Auswertung der experimentell ermittelten Brennweite

Das Ermitteln der unbekannten Brennweite erfolgte mit Hilfe eines selbst gebauten Gestells (vgl. Abb. 3.4). Zum Ausmessen der Apparatur wurde der PMS-150-Messschieber verwendet. Dieses Messinstrument ist in der Lage, auf hundertstel Millimeter genau zu messen.

Im derzeitigen Zustand der Versuchsanordnung betrug der Abstand zwischen Oberkante Distanzring und optischem Sensor 56,16mm und war damit zu groß gewählt. Experimentell konnte so nachgewiesen werden, dass der Abstand auf 20,89mm verkürzt werden musste. Durch angepasste Abstandshalter wurde der Fehler korrigiert. Damit stimmte jetzt die Lage des PSD mit der Brennebene überein.

Nachweis der Funktionsfähigkeit des optischen Sensors

Entlang der Ordinate und Abszisse sowie in die Ecken des Sensors traf Laserlicht punktförmig auf den PSD. Tabelle 3.1 zeigt die dabei aufgenommenen Messwerte.

Durch die aufgenommenen Werte kann zunächst kein Rückschluss auf eine genaue Position des Lichtpunktes vorgenommen werden. Dennoch sind deutliche Stromänderungen bei unterschiedlichem Lichteinfall zu erkennen.

Erst als die aufgenommenen Werte in die Formeln 2.1 und 2.2 eingesetzt wurden, konnte die Position des Lichtpunktes auf dem PSD visualisiert werden (vgl. Abb. 3.14).

Die Positionen des Lichtes wurden hier durch blaue Punkte markiert. Die Abbildung aller für die Messung eingestellter Lichtpunkte zeigt,

Position des Lasers	**X1** [μA]	**X2** [μA]	**Y1** [μA]	**Y2** [μA]	**X** [μA]	**Y** [μA]
Koordinatenursprung	224	222	222	225	-5	1
Links/Mitte (X1)	252	219	219	252	-66	0
Rechts/Mitte (X2)	221	246	246	222	49	1
Unten/Mitte (Y1)	242	222	244	222	2	-42
Oben/Mitte (Y2)	221	246	223	243	5	45
Ecke X2 Y2	230	233	269	215	66	50
Ecke X2 Y1	214	272	213	230	57	-51
Ecke X1 Y1	237	228	215	272	-66	48
Ecke X1 Y2	272	216	228	238	-66	-46

Tabelle 3.1: Strommessungen an den Ausgängen des PSD

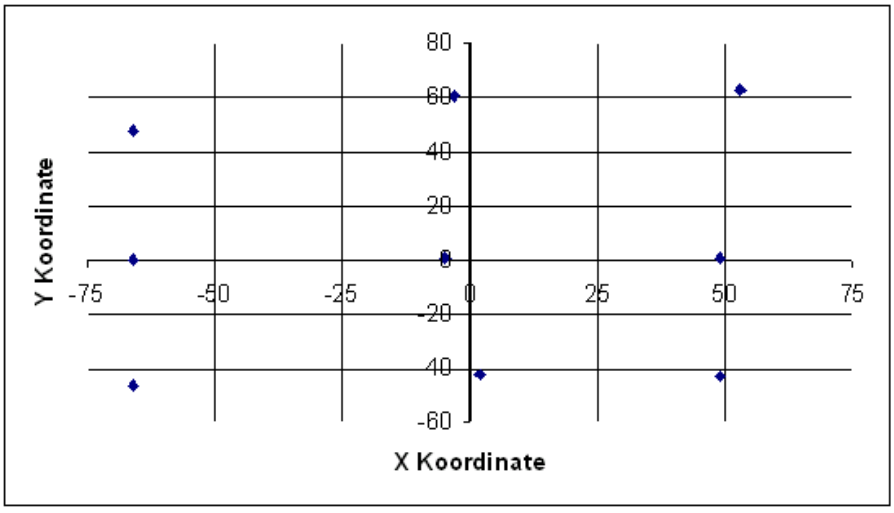

Abbildung 3.14: X-/Y-Koordinaten des PSD bei unterschiedlicher Beleuchtung vor Justierung der Platine

dass der Koordinatenursprung des PSD sich nicht auf der optischen Achse des Linsensystems befand. Deutlich ist ein Versatz des Sensors in Richtung X1 und Y2 zu sehen. Der Fehlstand konnte korrigiert werden und der Laserstrahl wurde entlang der optischen Achse auf den PSD geleitet. Dieses Mal wurden die Spannungen am Ausgang gemessen.

Warum wurde die Spannung gemessen und nicht der Stromfluss an den Ausgängen? Die Gründe finden sich in der Messweise von Strom und Spannung begründet. Für die Strommessung hätte der Multimeter in Reihe an die Ausgänge des PSDs angeschlossen werden müssen. Es

erwies sich jedoch als recht schwierig den Kontakt permanent herzustellen. Genauer ließ sich die Spannung mit dem Oszilloskop messen. Zudem hatten beide Messinstrumente bezüglich der Messgenauigkeit den gleichen Toleranzbereich.

Wie bereits beschrieben, handelt es sich bei dem verwendeten PSD um eine Matrix aus Photodioden. Jede Photodiode, die beleuchtet wird, hat einen Stromfluss zur Folge. Alle anderen bilden einen Widerstand.

Wie lässt sich jetzt von den aufgenommenen Werten auf den Stromfluss zurückschließen? Zur näheren Erläuterung dient die Diodenkennlinie in Abb. 3.15.

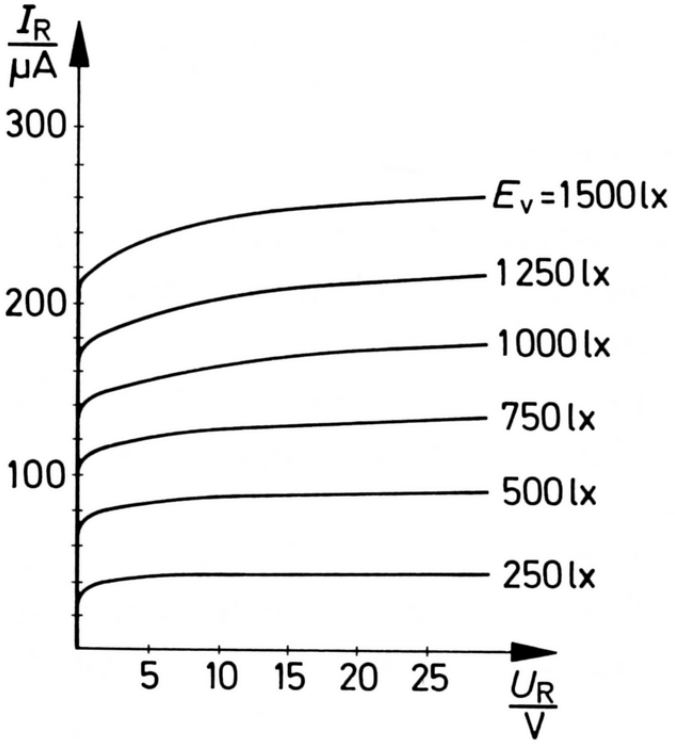

Abbildung 3.15: Diodenkennlinie liefert Rückschluss auf fließenden Strom[21]

Hier wurden in Abhängigkeit der Fotoempfindlichkeit E_V mehrere U-I-Kennlinien eingetragen. Obwohl die Diodenkennlinien nicht linear verlaufen, ist im Bereich niedriger Spannungen eine deutliche Stromänderung ablesbar.

Ein beliebiger Stromwert lässt sich auf genau einen Spannungswert zurückführen und umgekehrt. Aus diesem Grund ist es vollkommen

legitim die Spannung zu messen statt des Stromes. Tabelle 3.2 zeigt, dass wenn das Laserlicht entlang der optischen Achse auf den PSD einfiel, die Spannungen an allen Ausgängen gleich groß waren. Die Voraussetzung für korrektes Messen war gegeben.

Ausrichtung	**X1 [V]**	**X2 [V]**	**Y1 [V]**	**Y2 [V]**
0 ° / 0°	5,6	5,6	5,6	5,6

Tabelle 3.2: Messwerte nach Justierung des PSD mit der optischen Achse

Nach gleicher Herangehensweise wie beim ersten Strommessvorgang erfolgte ein zweiter. Die positiven Ergebnisse sind in Abb. 3.16 zu sehen. Neben einem geringen Kisseneffekt in den Randbereichen ist zu erkennen, dass der Sensor jetzt korrekt ausgerichtet war.

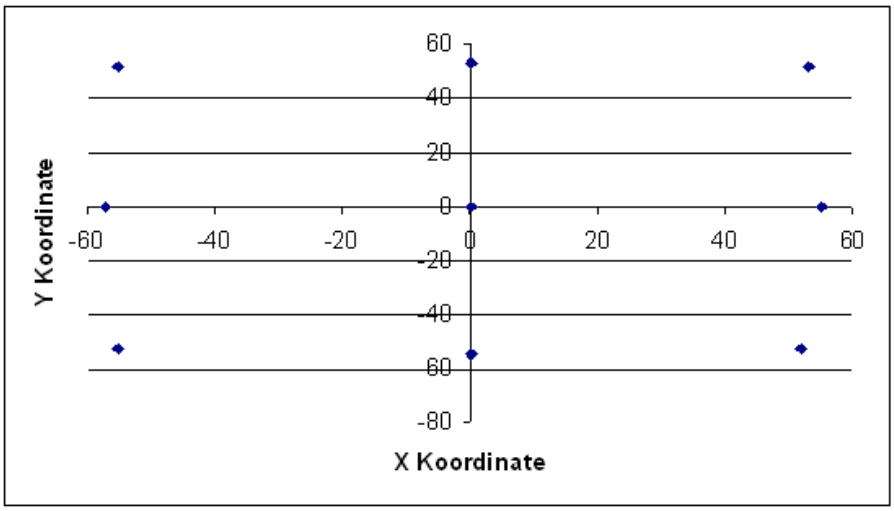

Abbildung 3.16: X-/Y-Koordinaten der Platine

Auswertung des Vergleichs der Schaltung des Prototyps mit der des Hamamatsu Referenzboards

Es stellte sich heraus, dass beide Schaltungen zu Beginn eine Strom-/Spannungs-Wandlung durchführen. Während bei der Schaltung des Prototyps eine Tiefpassfilterung erfolgte, wurde bei der Hamamatsu-Schaltung darauf verzichtet. Beim dem Frequenzfilter des Prototypen handelt es sich um einen Tiefpass zweiter Ordnung mit einer oberen Grenzfrequenz von 2,13Hz. Des Weiteren fehlt bei der Schaltung des

Prototyps die Berechnung der Y-Komponente. Die analoge Rechnung der X-Koordinate sowie die Summenberechnung werden durchgeführt.

Auf dem Hamamatsu-Board werden ebenfalls die analoge Rechnung für beide Koordinaten und die Summe durchgeführt. Dieses Board ist in der Lage, die Ergebnisse analog und digital zu präsentieren. Der Prototyp hingegen kann dies nur analog. Beide Schaltungen sind nicht in der Lage, das Umgebungslicht durch Filterung zu eliminieren.

Aufbau eines neuen Prototyps

Eine funktionelle Überprüfung der Schaltung des Prototyps zeigte seine Schwächen auf. Der Aufbau eines neuen Prototyps war erforderlich. Dieser wurde um die Berechnung der Y-Koordinate erweitert. Zudem wurde aus Gründen der späteren A/D-Wandlung die zweite Referenzspannung auf 1,65V abgesenkt.

Die Strom-/Spannungs-Wandlung sowie der Tiefpass zweiter Ordnung wurde für beide X- und beide Y-Komponenten separat aufgebaut. Die korrekte Funktionsweise dieser Gruppen konnte nachgewiesen werden indem sich das Umpositionieren des Lasers durch Spannungsänderungen am Oszilloskop wiederspiegelte. Darüber hinaus konnten die sinusförmigen Störungen, durch künstliche Lichtquellen verursacht, durch den Einsatz der Tiefpässe beseitigt werden. Die erfolgreich getesteten Bereiche wurden auf eine Lochplatine gelötet.

Bauteilbedingte Toleranzen würden bei gleichen Ausgangsströmen des Sensors zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Aus diesem Grund wurden alle Widerstände und Kondensatoren ausgemessen und aufeinander abgestimmt.

Das Ausmessen der OPV-Bausteine erfolgte in einem Experiment. Dabei wurde die Laserlichtquelle in Richtung Optik fixiert. Der X1-Sensorausgang wurde mit dem invertierenden Eingang des ersten OPV's verbunden und die Ausgangsspannungen gemessen. Die gleiche Messung wurde mit den verbleibenden drei OPVs im Baustein durchgeführt. Dem Vermessen des X1-Ausgangs folgten die verbleibenden Ausgänge X2, Y1 und Y2 des PSD. Während des Versuchs wurden drei

LM234-Bausteinen vermessen. Die Messwerte sind in Tabelle 3.3 dargestellt.

Diese Tabelle ist wie folgt aufgebaut: Ein PSD-Ausgang wird nacheinander an vier OPVs eines Bausteins angeschlossen. Die verschiedenen OPVs in einem Baustein sind in der zweiten Spalte durch die Ziffern 1 bis 4 gekennzeichnet. Es wurden drei Bausteine vermessen. Die dazugehörigen Ergebnisse befinden sich in der jeweiligen Spalte.

Ausgang des PSD	**OPV im LM324**	**1. LM324 U [mV]**	**2. LM324 U [mV]**	**3. LM324 U [mV]**
X1	1	632	640	632
X1	2	631	639	634
X1	3	631	639	634
X1	4	631	639	633
X2	1	633	639	632
X2	2	632	639	634
X2	3	632	639	633
X2	4	632	638	633
Y1	1	632	639	633
Y1	2	632	639	634
Y1	3	631	639	634
Y1	4	631	639	634
Y2	1	632	639	634
Y2	2	632	639	634
Y2	3	631	639	633
Y2	4	631	638	633

Tabelle 3.3: Ergebnisse des Ausmessens verschiedener LM324-Bausteine

Aus Tabelle 3.3 lässt sich ablesen, dass die OPVs eines Bausteins annähernd die gleiche Ausgangsspannung liefern. Unter gleichen Eingangsbedingung können verschiedene LM324-Bausteine jedoch recht unterschiedliche Messergebnisse liefern. Aus diesem Grund ist darauf zu achten, dass beim Aufbau der Schaltung für eine bestimmte Gruppe (z.B. Strom-/Spannungs-Wandlung) der selbe LM324-Baustein verwendet wird.

Beim Ausmessen der OPV-Bausteine fiel auf, dass mehrere LM324 defekte Komponenten besaßen. Dies hätte zwangsläufig zu fehlerhaften Ergebnissen geführt. Die weiteren Experimente wurden mit der neuen Schaltung durchgeführt.

3.5.2 Auswertung der Experimente

Auswertung der Bestimmung des Öffnungswinkels der Optik

Der Öffnungswinkel der Optik musste vermessen werden. Dies war erforderlich, um den möglichen Aktionsbereich des Roboters zu bestimmen. Der Versuchsaufbau ist in Unterkapitel 3.2 beschrieben. Tabelle 3.4 zeigt für jede Koordinate den ermittelten Winkel α.

Die errechneten Ergebnisse variieren zwischen 24,81 Grad und 25,29 Grad. Dabei war festzustellen, dass der gesamte horizontale Öffnungswinkel 50,47 Grad und damit minimal größer als 50 Grad ist und der gesamte vertikale Öffnungswinkel 49,76 Grad und damit unwesentlich kleiner als 50 Grad ist. Abgesehen von Fehlern in der Linse, wie chromatische oder sphärische Aberration, kamen Fehler beim Erfassen des Standortes des Laser hinzu, sodass davon ausgegangen werden kann, dass der Öffnungswinkel in beide Richtungen 50 Grad beträgt.

Position bei	**Winkel** α [°]
X1	25,29
X2	25,18
Y1	24,81
Y2	24,95

Tabelle 3.4: Bestimmung des Blinkwinkels der Optik

Als Schlussfolgerung lässt sich sagen, dass das verwendete Normalobjektiv für das „Kornknecht“Projekt ungeeignet ist. Die Raumverhältnisse im Silo lassen es nicht zu, die Messeinrichtung rückwärtig zu verschieben, bis der 50 Grad Öffnungswinkel ausreicht, um das gesamte Silo zu überwachen. Um den „Kornknecht“ ständig zu verfolgen, müsste ein Weitwinkelobjektiv mit einem Öffnungswinkel von 90 Grad eingesetzt werden.

Auswertung der Messungen mit IR-Filter

Für Messungen im IR Bereich stand ein 850nm IR-Filter zur Verfügung. Diente der Laser als Lichtquelle, konnte keine Stromabgabe an den Sensorausgängen festgestellt werden.

Die Ursache liegt in der eng beschränkten Bandbreite des Filters. Laser und Filter liegen in der Wellenlänge 200nm auseinander. Wurde hingegen der 300W starke Bauscheinwerfer als Lichtquelle verwendet, konnte er bis zu einer Entfernung von 109cm geortet werden. Ohne IR-Filter konnte der Scheinwerfer bis ca. 1m 50 als Lichtquelle identifiziert werden. Die relativ kurzen Distanzen ließen sich auf die unveränderlich eingestellte Rückkopplung bei der Strom-/Spannungs-Wandlung zurückführen. Abhilfe schaffte der Ersatz der 10kΩ Koppelwiderstände durch Drehpotentiometer mit einem maximalen Widerstand von 4,7MΩ.

Als Fazit lässt sich sagen, dass der Einsatz eines IR-Filters durchaus sinnvoll sein kann, um künstliche Lichtquellen vom Umgebungslicht zu unterscheiden. Es muss jedoch darauf geachtet werden, die Wellenlängen der Lichtquelle und des Filters aufeinander abzustimmen.

Auswertung der Messungen im Gebäude

In einem ca. 40m langen Zwischengang im Haus 1 in der Richard Wagner Str. 31 in Rostock-Warnemünde wurden Distanzmessungen mit dem beschriebenen Laser und einem Bauscheinwerfer durchgeführt. Der Scheinwerfer wurde für diese Messungen mit einer 500W Lampe ausgerüstet.

Bauscheinwerfer und Kamera wurden auf gleiche Höhe eingestellt. Da die Lichtquelle sich unter gleichbleibendem Winkel von 0 Grad von der Kamera entfernte, wurde erwartet, dass sowohl die X- als auch Y-Koordinaten stets den selben Wert behalten. Der X-Wert diente wie in späteren Versuchen als Indikator für die horizontale Auslenkung und der Y-Wert sollte im Falle einer Höhendifferenz zwischen Kamera und Lichtquelle die räumliche Tiefeninformation liefern.

Weiterhin sollte die Summe, die die Lichtintensität widerspiegelt, mit größer werdender Entfernung kleiner werden. Wie kommt dieser Effekt zustande? Idealisiert könnte die Lichtquelle, als Punkt gesehen, das Licht kugelförmig ausstrahlen. Die Lichtquelle befindet sich im Abstand r von der Oberfläche des optischen Sensors. Die abgestrahlte Lichtmenge verteilt sich auf der Kugeloberfläche und trifft im Abstand

r auf den Sensor. Weil die Formel für die Kugeloberfläche $A_O = 4\Pi r^2$ ist und die Lichtintensität sich auf der Oberfläche verteilt, nimmt sie quadratisch mit dem Abstand r ab. Die Ergebnisse der Messungen wurden in Tabelle 3.5 dargestellt.

Entfernung [m]	X [digits]	Y [digits]	$\sum$ [digits]	X [°]	Y [°]
5	600	603	231	0	0
10	600	603	230	0	0
15	600	603	231	0	0
20	600	603	231	0	0
25	600	603	230	0	0
30	600	603	231	0	0
35	600	603	231	0	0
40	600	603	231	0	0

Tabelle 3.5: Verschiebung der Lichtquelle unter einem Winkel von 0 Grad ohne Höhendifferenz zwischen Lichtquelle und Kamera

Die Erwartungen für die X- und Y-Komponente wurden erfüllt. Beide blieben über den gesamten Versuch konstant. Bei einem eingestellten Koppelwiderstand der Strom-/Spannungs-Wandlung von 280kΩ und dem Lichteinfall unter einem Winkel von 0 Grad beträgt der X-Wert 600 digits. Unter gleichen Voraussetzungen beträgt der Y-Wert 603 digits was ebenfalls einem Winkel von 0 Grad entspricht.

Die Summe als Wert für die Lichtintensität verringerte sich lediglich um den Wert von einem digit. Dies geschah bei 10 und 25m Entfernung. Damit traf die Erwartung für die Summenwerte nicht ein.

Der Versuch wurde erneut durchgeführt. Dieses Mal bestand eine Höhendifferenz zwischen Lichtquelle und Kamera von 72,5cm. Die Lichtquelle wurde unter gleichbleibendem Winkel von 0 Grad von der Kamera entfernt. Hierbei sollte sich bestätigen, dass die X-Komponente konstant und sowohl Y-Komponente als auch Summe mit zunehmender Entfernung kleiner werden.

Die Ergebnisse aus Tabelle 3.6 spiegeln jedoch etwas anderes wider. Bis zu einer Entfernung von 5m fielen Y-Werte und die Summe ab. Dann stiegen X- und Y-Wert leicht an und pegelten sich auf die zuvor bestimmten digitalen Werte für 0 Grad ein. Von 10m bis zu einer

Entfernung [m]	X [digits]	Y [digits]	∑ [digits]	X [°]	Y [°]
2	598	695	232	0	0
3	598	656	232	0	0
4	598	595	232	0	0
5	598	598	231	0	0
10	598	604	231	0	0
15	600	603	231	0	0
20	600	604	231	0	0
25	600	603	231	0	0
30	600	603	231	0	0
35	601	604	231	0	0
40	600	604	231	0	0

Tabelle 3.6: Verschiebung der Lichtquelle unter einem Winkel von 0 Grad mit Höhendifferenz zwischen Lichtquelle und Kamera

Entfernung von 40m blieben alle Werte relativ stabil und differierten lediglich um ein digit.

Die Messwerte spiegelten eines wider: Auffällige Unterschiede bestanden nur während der ersten 5m. Dies deutet darauf hin, dass durch die eingestellte Verstärkung die Lichtquelle nur in diesem Bereich erkannt werden konnte. Weiterhin lässt sich aus den Ergebnissen des zweiten Versuches ableiten, dass ab einem bestimmten Abstand (hier ca. 5m) die Verstärkung der Strom-/Spannungs-Wandlung nicht ausreicht. Dies hat zur Folge, dass kein Unterschied festzustellen war, ob sich die Lichtquelle bei gleicher Höhe zur Kamera direkt vor ihr befand, bereits deren Sichtfeld verlassen hatte oder auf der PSD Oberfläche zu wenig Photonen auftrafen um signifikate Änderungen an den vier PSD Abgriffpunkten zu erzeugen. Die Messwerte aus Tabelle 3.6 deuten ab einer Entfernung von 10m ebenfalls darauf hin, dass die Lichtquelle das Sichtfeld verlassen hatte oder sich auf gleicher Höhe mit der Optik befand, obwohl der Höhenunterschied weiterhin bestand.

Bei Einsatz eines 90 Grad Weitwinkelobjektives würde permanent der gesamte Silo überwacht werden. Damit ließe sich der Fehler ausschließen das der Roboter samt Lichtquelle aus dem Sichtfeld der Erfassungseinheit verschwindet. Deuten die Messwerte dann das Verlassen des Sichtfeldes an, kann mit Sicherheit davon ausgegangen werden das der Widerstand der Strom-/Spannungs-Wandlung erhöht werden

muss. Unter diesen Voraussetzung wäre eine dynamische Widerstandsanpassung wünschenswert.

Zusätzlich zeigen die in beiden Versuchen aufgenommenen Messwerte, dass die Abstände zwischen den Messungen zu groß gewählt waren, als dass sie aussagekräftige Ergebnisse hätten liefern können.

Auswertung der Messungen im Gebäude bei Dunkelheit

Um Störungen bei Tageslicht zu vermeiden, wurden Messungen bei Dunkelheit durchgeführt. In 5 Grad Abständen und über den gesamten Öffnungswinkel des Objektives verteilt sollte das Licht des Bauscheinwerfers auf den Sensor treffen. Die Lichtquelle wurde unter gleichbleibendem Winkel rückwertig von der Messeinrichtung entfernt. Zu jedem Messpunkt wurden die digitalisierten X- und Y-Werte aufgenommen.

Für die Darstellung wurden die X- und Y-Koordinaten aus den Formeln 2.1 und 2.2 berechnen. Jeder Messwert wurde auf die dazugehörige Lichtintensität normiert. Im Anschluss wurde aus allen Messwerten eines Winkels der Mittelwert gebildet. Um die normierten Mittelwerte in Grad ausgeben zu können, wurde Bereich zwischen -25 Grad und +25 Grad nochmals auf 50 Einheiten normiert. Im Anschluss folgte eine Verschiebung um 25 Einheiten in Richtung negativen Zahlenbereich.

Zur besseren Veranschaulichung zeigt Tabelle 3.7 die über den gesamten Öffnungswinkel normierte Mittelwerte der eingestellten Winkel sowie die berechneten Winkel auf dem Sensor. Die Ergebnisse aus Tabelle 3.7 wurde in Abb. 3.17 dargestellt. Während die blaue Linie die eingestellten Winkel zeigt, symbolisieren die Säulen die gemessenen Winkel auf dem PSD.

Eingestellter Winkel [Grad]	Auf die Lichtintensität normierter Mittelwert	Vom Sensor gemessener Winkel [Grad]
-25	2,011815095	-25
-20	2,046830898	-23,45565768
-15	2,22183736	-15,73714611
-10	2,584773025	0,269823617
-5	2,582233295	0,157810985
0	2,580375802	0,075887849
5	2,593549288	0,656893268
10	2,801788203	9,84109399
15	2,91468916	14,82049498
20	3,036525234	20,19397169
25	3,145495208	25

Tabelle 3.7: Normierte Mittelwerte und berechnete Winkel der X-Koordinate bei Dunkelheit

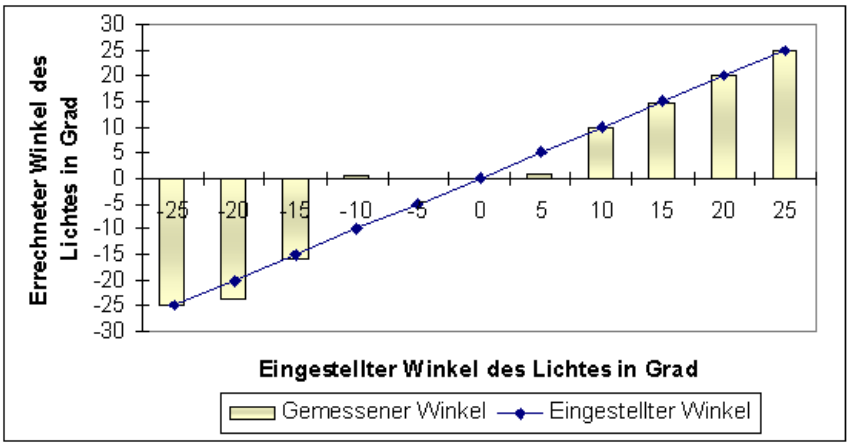

Abbildung 3.17: Eingestellter und gemessener Winkel des einfallenden Lichtes für die X-Koordinate bei Dunkelheit

Bei einer rückwertigen Verschiebung der Lichtquelle unter konstantem Winkel wurde erwartet, dass der digitalisiert Wert konstant blieb. Dieser Wert sollte kleiner werden, wenn Winkel kleiner 0 Grad eingestellt waren. Im Gegensatz dazu sollten die Messwerte bei Winkeln größer 0 Grad ansteigen. Bedingt durch die 5 Grad Abstufung wurde erwartet, diese Stufen im Ergebnis wiederzufinden. Über den gesamten Öffnungswinkel verteilt, trat die Erwartung nur bedingt ein. Für die X-Koordinate ist eine Unterscheidung von kleinen Winkeln um die optische Achse problematisch. Die Tendenz zwischen -25 Grad und +25

Grad ist jedoch deutlich zu erkennen. Während der normierte Wert von ≈ 2,01 dem Winkel -25 Grad zugeordnet werden konnten, wurde für den +25 Grad Winkel der normierte Wert ≈ 3,15 ermittelt. In diesem Bereich verteilen sich dann alle Winkel der X-Komponente.

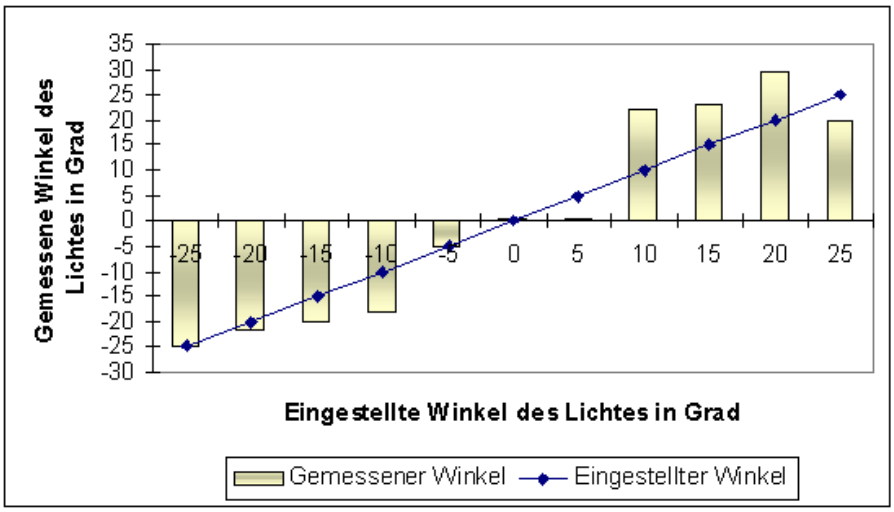

Abbildung 3.18: Eingestellter und gemessener Winkel des einfallenden Lichtes für die Y-Koordinate bei Dunkelheit

Diese Messreihe wurde unter gleichen Bedingungen für die Y-Komponente wiederholt. Die Ergebnisse sind in Abb. 3.18 zu sehen. Auch hier lässt sich eine Tendenz über den gesamten Öffnungswinkel erkennen. Jedoch wurde bei eingestellten Winkeln um -15 bzw. +15 Grad deutlich andere Winkel vom PSD gemessen. Damit müssen diese Werte als nicht zuverlässig eingestuft werden. Bei dieser Messung treten bei -10 bzw. +10 Grad die größten Fehler auf.

Des Weiteren fällt auf, dass bei einem eingestellten Winkel von 25 Grad der mittlere normierte Y-Wert stark abfällt. Hierbei handelt es sich um den Randbereich der Optik. Ausgesendeten Lichtstrahlen treffen gerade noch auf das Objektiv. Eine fehlerhafte Ausrichtung der Lichtquelle über den maximalen Öffnungswinkel führt somit zu falschen Messergebnissen.

Auswertung der Messungen im Gebäude bei Tageslicht

Als Vergleich zu den Ergebnissen der Messung bei Dunkelheit wurden Messungen unter Einfluss von Tageslicht durchgeführt. Auch hier wurden beide Koordinaten vermessen. Für eine äquivalente Darstellung wurden die Messwerte erneut auf Grad umgerechnet. Abb. 3.19 zeigt die Ergebnisse für die X-Koordinate.

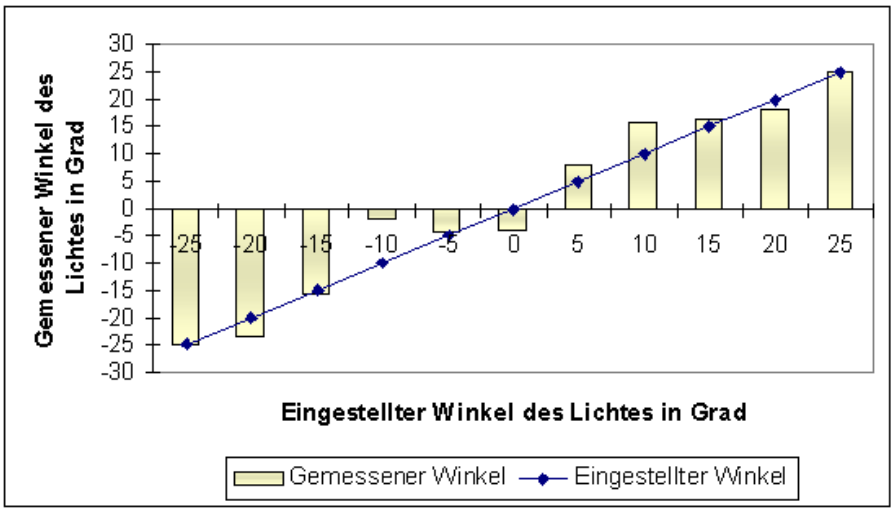

Abbildung 3.19: Eingestellter und gemessener Winkel des einfallenden Lichtes für die X-Koordinate unter Einfluss von Tageslicht

Auch hier ist die Tendenz über den gesamten Öffnungswinkel der Optik wiederzufinden. Im Vergleich zu den Messungen bei Dunkelheit fällt auf, das auch hier der Fehler bei Winkel von -10 bzw. +10 Grad am größten ausfällt. Ebenfalls muss der Wert bei 0 Grad als unzuverlässig eingestuft werden. Alle weiteren Messwerte liegen nahe ihrem Erwartungswert, erreichen diesen jedoch nicht.

Wie das Einstrahlen fremder Lichtquellen die Ergebnisse negativ beeinflusst ist in Abb. 3.20 zu sehen. Wenn aus den bisherigen Diagrammen noch abzuschätzen war aus welcher Richtung der Lichtstrahl eintraf, so ist dies bei der Vermessung der Y-Koordinate unter Einfluss von Tageslicht nicht mehr der Fall. Die gemessenen Werte variieren extrem. Beim Zurückschließen der aufgenommenen Werten auf den vom PSD gemessenen Winkel lässt sich nicht unterscheiden ob das Licht aus einem Winkel von -15 Grad oder +25 Grad durch die Optik fiel.

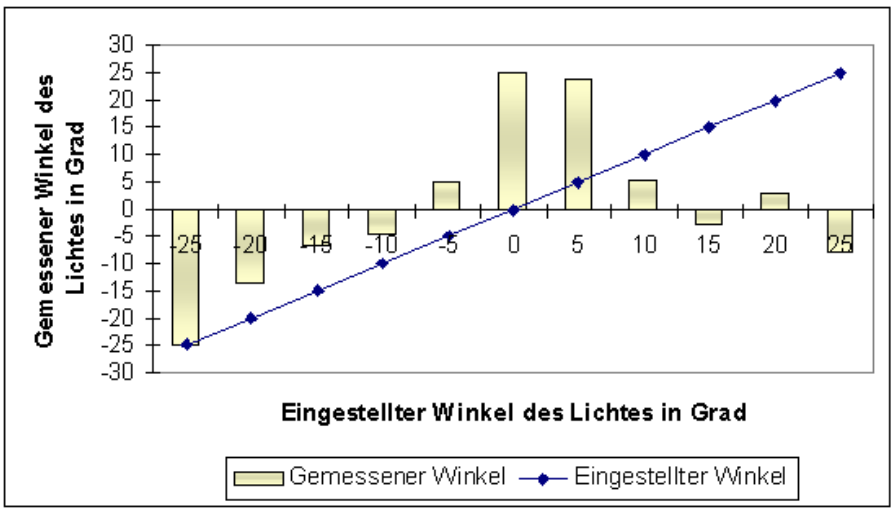

Abbildung 3.20: Eingestellter und gemessener Winkel des einfallenden Lichtes für die Y-Koordinate unter Einfluss von Tageslicht

Dieses Beispiel zeigt sehr gut, dass die Kompensation von Fremdeinstrahlungen von größter Wichtigkeit ist. Die Messergebnisse sind ohne die Kompensation nicht verwendbar.

Auswertung der Messungen im Gebäude mit der Laserlichtquelle

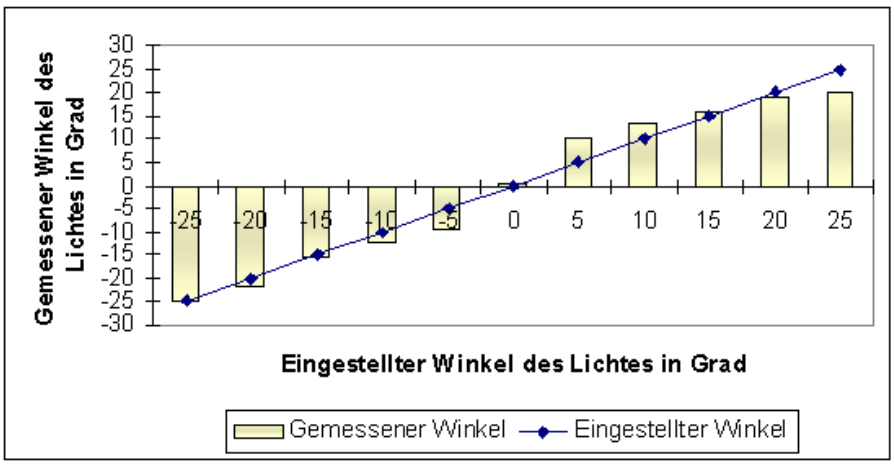

Abbildung 3.21: Eingestellter und gemessener Winkel des einfallenden Lichtes für die Y-Koordinate mit dem Laser als Lichtquelle

Die Messungen mit dem Laser als Lichtquelle lieferten relativ gute Ergebnisse (vgl. Abb. 3.21). Alle Messwerte eines Winkels lagen sehr

nahe zusammen. Der größte Fehler liegt hier bei -5 bzw. +5 Grad. Der Erfassungswert bei +25 Grad ist ebenfalls sehr groß. Gleichfalls wie in Abb. 3.18 handelt es sich hier um den Randbereich der Optik. Dadurch bedingt führt eine Fehlpositionierung der Lichtquelle zu gravierenden Fehlern. Während der Baustrahler leicht in Richtung Optik eingestellt werden konnte, erwies es sich als sehr schwierig den Laserstrahl exakt auf das Objektiv auszurichten.

Auswertung der Messungen im Gebäude mit der lichtstärkeren Optik

Das Objektiv des existierenden Prototyps besaß sehr kleine Linsen. Mit zunehmendem Durchmesser der Linse vergrößert sich die Menge des eintretenden Lichtes. Für diesen Versuch wurde ein lichtstärkeres Objektiv verwendet (vgl. Abb. 3.13). Bei Dunkelheit wurden mit diesem Objektiv Messungen über den gesamten Öffnungswinkel durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 3.22 zu sehen.

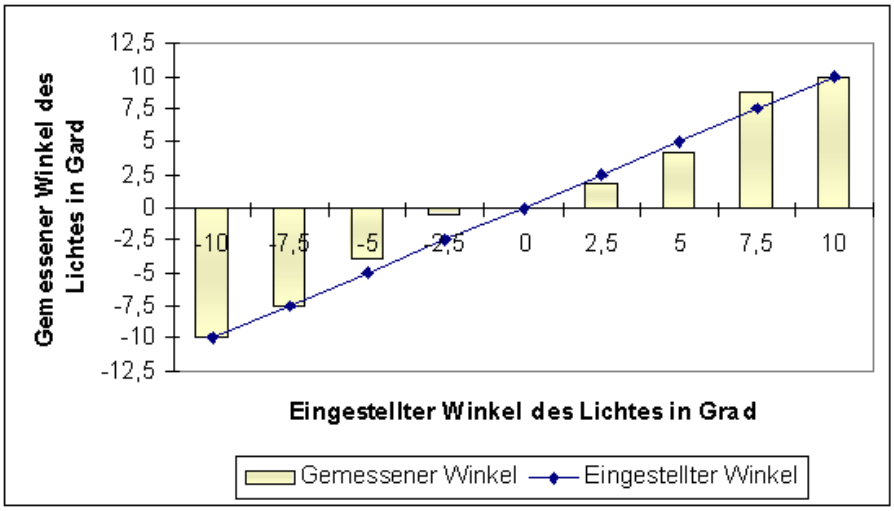

Abbildung 3.22: Eingestellter und gemessener Winkel des einfallenden Lichtes für die Y-Koordinate mit dem Docter-Wetzlar-Jena Objektiv

Weil dieses Objektiv nur einen Öffnungswinkel von 20 Grad besaß, wurden die Messungen in Abständen von 2,5 Grad durchgeführt. Trotz der kleineren Abstände ist es möglich eine Zuordnung der gemessenen Winkel zu den eingestellten Winkel vorzunehmen. Der größte Fehler trat bei einem eingestellten Winkel von 2,5 Grad auf. Im Vergleich zum

bisher eingesetzten Objektiv kann in jedem Fall eine Unterscheidung auf 5 Grad Genauigkeit erfolgen.

Damit zeigt sich, das dieses Objektiv besser geeignet ist als das bis dahin verwendete Objektiv des existierenden Prototyps. Eine Optik mit noch größeren Linsen dürfte die Messergebnisse weiter verbessern. Da diese Messungen bei Dunkelheit durchgeführt wurden, kam es nur zu geringen Einstrahlungen fremder Lichtquelle bzw. Reflexionen an den Fensterscheiben. Ohne Kompensation des Umgebungslichtes dürfte die Verwendung des Docter-Wetzlar-Jena Objektiv die Messergebnisse bei Tageslicht negativ beeinträchtigen.

3.5.3 Auswertung der Erfassungsgenauigkeit einer Lichtquelle in Abhängigkeit von der Entfernung

Mit zunehmender Entfernung der Lichtquelle vom PSD nimmt die Genauigkeit der Erfassbarkeit ab. Begründet durch die Formeln 2.1 und 2.2 stellt sich bei zu großer Entfernung wieder der Wert des 0 Grad Winkels ein. Die Entfernung ist von verschiedenen Gegebenheiten wie den Lichtverhältnissen und der verwendeten Optik abhängig. Diese Zusatzinformationen stehen der Software nicht zur Verfügung. Ihr Darstellungsbereich ist auf den Dynamikbereich des Lasers angepasst. Wird z.B. eine andere Lichtquelle verwendet, ändert sich der Dynamikumfang der digitalisierten Werte. Als Folge wird die Position des Lichtpunktes verfälscht dargestellt. Die Fehldarstellungen der Position des Lichtpunktes in Abhängigkeit der Entfernung der Lichtquelle ist in den Diagrammen 3.23 bis 3.25 dargestellt.

Abbildung 3.23 zeigt die aufgenommenen Messergebnisse bei Dunkelheit. Bis zu einer Entfernung von 2,5m kann eine Zuordnung zwischen eingestelltem und errechnetem Winkel des eintreffenden Lichtes erfolgen. Diese Zuordnung ist ungenau. Mit zunehmender Entfernung ist keine Zuordnung mehr möglich. So ist bei einer Entfernung von 3,5m keine Unterscheidung mehr zu treffen aus welcher Richtung das Licht durch die Optik fiel.

Unter Einfluss von Tageslicht wurden die Werte in Abb. 3.24 aufge-

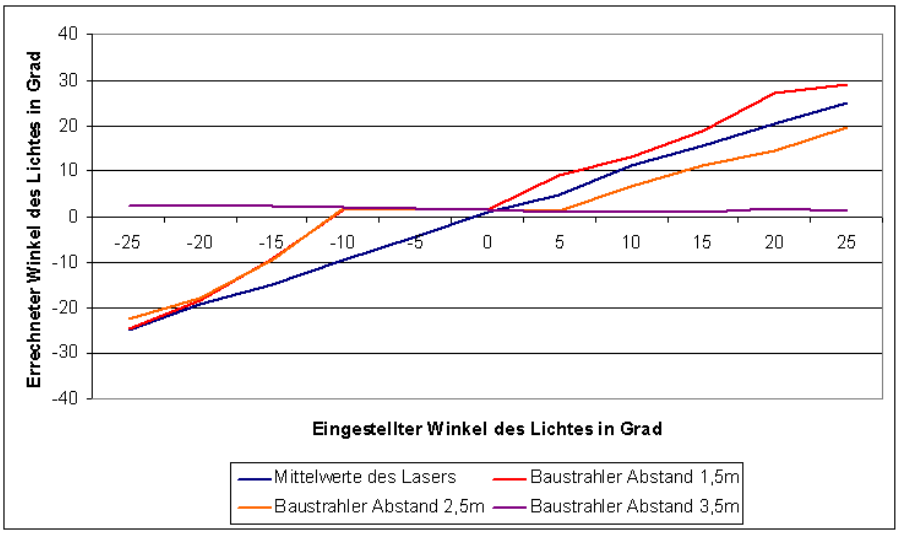

Abbildung 3.23: Entfernungsmessung der Lichtquelle bei Dunkelheit

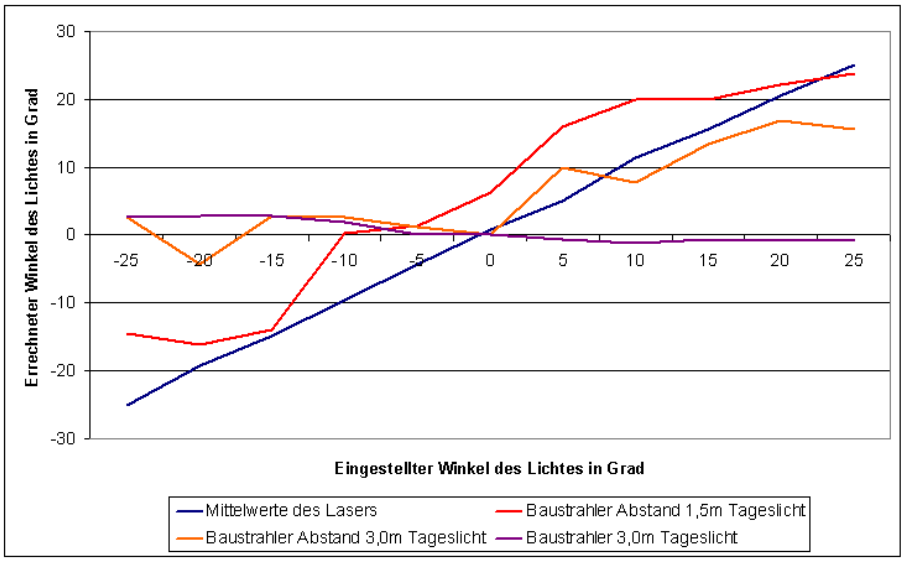

Abbildung 3.24: Entfernungsmessung der Lichtquelle bei Tageslicht

nommen. Dabei wurden bis zu einer Entfernung von 1,5m ähnliche Ergebnisse erzielt wie in Abb. 3.23. Durch das zusätzliche Tageslicht verschlechtert sich die Erfassbarkeit bereits bei 2,5m Entfernung. Ab 3,0m war keine Zuordnung der Winkel mehr möglich.

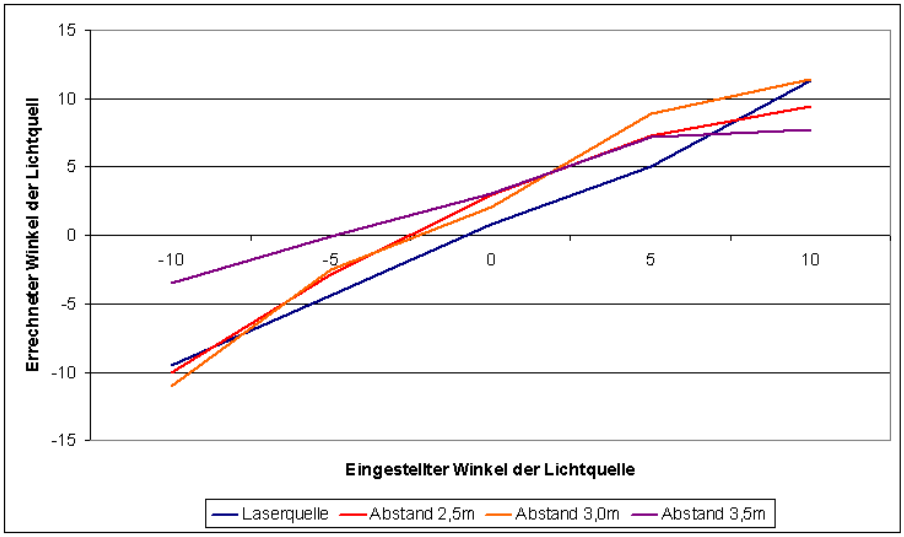

Abbildung 3.25: Entfernungsmessung der Lichtquelle mit lichtstärkerer Optik

Für die Messergebnisse in Abb. 3.25 wurde die Optik gegen eine lichtstärkeres Objektiv getauscht. Da dieses nur einen Öffnungswinkel von 20 Grad besitzt, ist hier der Bereich zwischen -10 und +10 Grad dargestellt. Diese Messreihe wurde bei Dunkelheit aufgenommen. Deutlich ist eine genauere Erfassbarkeit als in den Abbildungen 3.23 und 3.24 erkennbar. Der relative Fehler zwischen den Kennlinien des Bauscheinwerfers und der der Laserquelle ist bis zu einem Abstand von 3,0m gering. Er wird bei 3,5m größer, ist jedoch deutlich geringer als in Abb. 3.23 bei gleichem Abstand. Damit zeigt sich, dass ein lichtstärkeres Objektiv sich positiv auf die Messergebnisse auswirkt.

Abschließender Vergleich zwischen Hamamatsu Referenzboard, Schaltung des existierenden Prototyps und der Schaltung des neu entwickelten Prototyps

Die Schaltung des C9069 Hamamatsu Board sowie der Schaltplan des existierenden Prototyps und die entwickelte Schaltung für den neuen Prototyp besitzen mehr Unterschiede als Gemeinsamkeiten.

Gemeinsam haben sie nur das Wandeln der Ausgangsströme des PSD in proportionale Spannungen. Dabei ist keine der drei betrachteten Schaltungen in der Lage die Strom-/Spannungs-Wandlung dynamisch von der auftreffenden Lichtmenge durchzuführen. Ebenfalls führt keine Schaltungen eine Filterung des Umgebungslichtes durch.

Das Hamamatsu-Board verzichtet auf jegliche Kompensation von frequenten Anteilen und wandelt die Spannungen in digitale Werte. Diese werden an die mitgelieferte Software übertragen und für die Darstellung wieder in analoge Werte umgerechnet.

Nur die beiden Prototypen besitzen einen Tiefpassfilter mit einer oberen Grenzfrequenz von 2,13Hz. Während der existierende Prototyp lediglich die X-Komponente und die Summe analog berechnen konnte und keine Möglichkeit der Digitalisierung bot, kann der neue Prototyp zusätzlich die Y-Komponente analog berechnen und die analogen Ergebnisse mittels des CC1010DK 868 Development Kit digitalisieren.

Beim existierenden Prototyp betrug die zweite Referenzspannung 26V und lies sich mit den vorhandenen A/D-Wandlern nicht digitalisieren. Aus diesem Grund wurde beim neuen Prototyp diese Referenzspannung auf 1,65V gesenkt und entsprach damit die halben möglichen zu wandelnden Spannung des verwendeten A/D-Konverters. Der neu entwickelte Prototyp verzichtet gegenüber dem existierenden Prototyp auf die Kondensatoren an den Ausgängen der aktiven Tiefpassfilter und der X-,Y- und Summen-Werten. Bei fallender Ausgangsspannung des OPVs würden sich diese Kondensatoren gegen den Ausgang des OPVs entladen. Die Folge könnte eine Beschädigung des Bauteils sein.

4 Diskussion

Ziel dieser Arbeit war es, mit Hilfe einer zweidimensionalen Photodiode eine Positionsbestimmung innerhalb geschlossener Räume durchzuführen. Eine Segmentierung des existierenden Prototyps zeigte seine Schwachstellen auf. Nach Anpassungen der Optik und der Lage des Sensors konnten mit Hilfe einer neuen analogen Schaltung Messungen durchgeführt werden.

Die Auswertung zeigte, dass bei Dunkelheit bessere Messergebnisse erzielt werden konnten als am Tag. Die Laserlichtquelle bot bei annähernd konstanter Lichtintensität bessere Ergebnisse als der 500W starke Baustrahler. Es erwies sich jedoch als sehr schwierig, den Laserstrahl exakt auf die Optik zu richten. In den wenigsten Fällen war es möglich eine Positionsunterscheidung auf 5 Grad Genauigkeit zu erzielen. Durch eine lichtstärkere Optik konnte der Erfassungsbereich auf 3,5m erhöht werden. Auf Grund des geringen Erfassungsbereiches der Lichtquelle von maximal 3,5m muss von der Verwendung eines PSDs zur Indoor-Lokalisierung für das „Kornknecht“Projekt abgesehen werden.

Im Laufe der Arbeit wurde der existierende, nicht einsatzfähige Prototyp systematisch in Segmente unterteilt. Die Zerlegung half bei der Fehlersuche. Die Probleme konnten behoben und ein neuer funktionsfähiger Prototyp entworfen werden. Mit ihm konnte erfolgreich nachgewiesen werden, dass es möglich ist, mit dem optischen Sensor plausible Messreihen aufzunehmen.

Die analoge Schaltung des aktuellen Prototyps ist stark an die des existierenden Prototyps angelehnt. So ist die Strom-/Spannugs-Wandlung vierfach ausgelegt. Durch bauteilbedingte Toleranzen und durch den unzureichenden Abgleich der Koppelwiderstände der Strom-/Spannungs-

Wandlung werden bei gleichen Ausgangsströmen des optischen Sensors unterschiedliche Spannungen erzeugt. Dies führt zu einer unzureichend genauen Bestimmung der Position des Lichtpunktes auf dem Sensor. Erschwerend kommt hinzu, dass der neue Prototyp keine Filterung des Umgebungslichtes durchführt. Auch dies verschlechtert die Positionsbestimmung.

Für eine weiterführende Bearbeitung des Themas ist zu empfehlen nur eine Messtrecke aus Strom-/Spannungs-Wandlung und Tiefpassfilterung aufzubauen. Eine Messstrecke, in der alle vier PSD-Ausgänge die selben Bauteile benutzen, würde die Positionsbestimmung verbessern. Analogmultiplexer könnten die Ausgänge des optischen Sensors nacheinander an diese Messstrecke schalten.

Weiterhin sollte eine dynamische Rückkopplung der Strom-/Spannungs-Wandlung mit Hilfe eines PMOS-Transistors die Erfassungsreichweite erhöhen. Eine zusätzliche Filterung des Umgebungslichtes könnte mit Hilfe eines Sigma-Delta-Wandlers aufgebaut werden.

Für den Anwendungsfall „Kornknecht“ kann optional eine Datenübertragung per Funk auf Bluetooth- oder WLAN-Ebene entwickelt werden.

Mit den genannten Änderungen könnten in Zukunft vier neue Prototypen entworfen werden. Sie sollten lichtstärkere Objektive besitzen. Mit ihnen könnte dann ein größer angelegter Feldversuch durchgeführt werden.

5 Softwareentwicklung mit QT

Die Darstellung der Messwerte erfolgt über eine grafische Benutzeroberfläche (GUI). Das GUI wurde unter Suse Linux 10.1 mit Hilfe der QT-Softwarebibliotheken entwickelt. Qt ist eine Klassenbibliothek für die plattformübergreifende Programmierung grafischer Benutzeroberflächen unter C++. Die folgende Pakete müssen installiert werden:

- Qt3 die Qt Klassenbibliothek
- Qt3devel Include-Dateien
- Qt3develdoc Beispiele und Tutorials
- Qt3develtools Qt Hilfsprogramme wie Qt Designer

Im Mittelpunkt dieses Kapitels steht die Darstellungssoftware. Für weitere Informationen zu QT sei auf die QT Hilfe[1] sowie auf das Fachbuch von Burkhard Lehner[20] verwiesen.

Der Kern dieser Arbeit lag im Nachweis der Messbarkeit von Strömen die vom PSD abgegeben werden sowie in der Berechnung der X- und Y-Koordinaten des Lichtpunktes auf dem PSD und nicht in der Entwicklung der graphischen Oberfläche. Aus diesem Grund ist in der aktuellen Softwareversion interaktives Agieren nicht vorgesehen.

Die Darstellungssoftware ist in zwei Bereiche unterteilt. In der linken Ebene befindet sich eine schematische Darstellung des optischen Sensors. Auf der rechten Seite werden die eintreffenden digitalen Werte dargestellt (vgl. Abb. 5.1).

Die Arbeitsweise der Software ist wie folgt. Nach Programmstart wird eine Verbindung zur ersten seriellen Schnittstelle des Rechners hergestellt. An dieser befindet sich eine Basisstation welche die Messwerte des Transponders empfängt. In einer späteren Version kann die

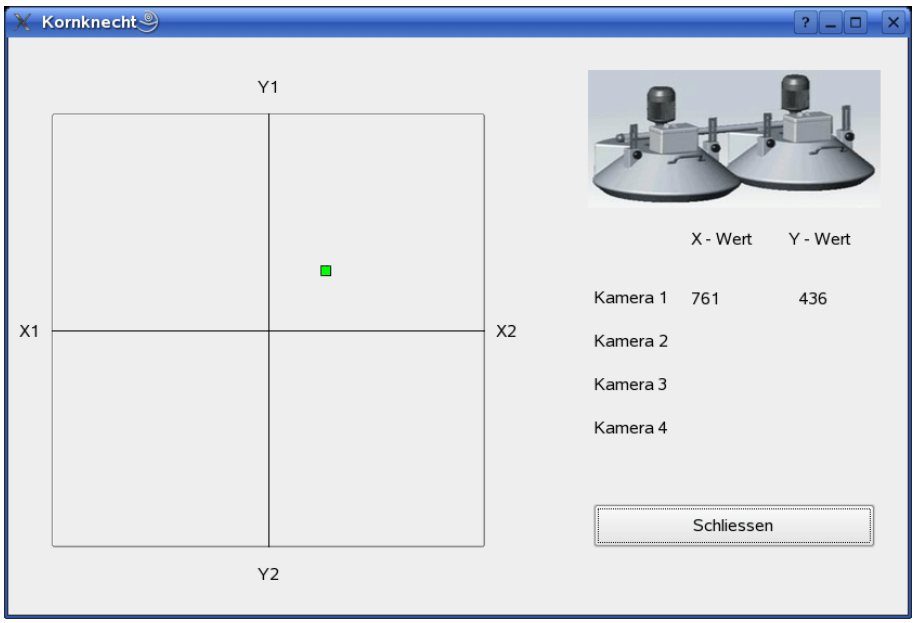

Abbildung 5.1: Grafische Oberfläche der Darstellungstellungssoftware

Basisstation per Funkverbindung von mehreren Transpondern Daten empfangen.

Im empfangenen Datenstrom befindet sich die ID des Transponders. Die Software wertet den Datenstrom aus und ordnet die mitgesendeten X-Y-Werte den Textlabeln der entsprechenden Erfassungseinrichtung zu. Aus allen X- bzw. Y-Werten wird je ein Mittelwert gebildet. Diese werden für die Darstellung des Lichtpunkten auf der PSD Fläche in der linken Ebene benötigt.

Weil zur Zeit nur Werte eines Transponders empfangen werden, wird nur eine Erfassungseinheit in die Darstellung eingebunden. In einer weiterführenden Arbeit ist es denkbar die Software dahingehend zu erweitern, sodass die observierte Fläche samt errechneter Position der Lichtquelle dargestellt wird.

Literaturverzeichnis

[1] (01.01.2007) http://doc.trolltech.com/3.0/tutorial.html: QT Einführung und Beispiele.

[2] (01.09.2006) http://llh-hessen.de/landwirtschaft/////bw_vtec/vtec/getreide.htm: Getreide und Ölsaaten fachgerecht lagern und gesund erhalten.

[3] (03.09.2006) http://news.abacho.de/vermischtes/artikel_anzeigen/index.html?news_id=17292: Schwache Ernte lässt Mehlpreise steigen, 2006.

[4] (06.01.2007) http://www.areamobile.de/specials/special_agps_drei.php: AGPS. Sebastian Scherl, 2004.

[5] (12.08.2006) http://www.kornknecht.de/: Getreidetechnik Wellenbrock.

[6] (14.11.2006) http://www.gemis.info/: Maaser gemis KG.

[7] (16.10.2006) http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Sammellinse.png: Sammellinse. Wikipedia.

[8] (16.11.2006) http://www.uni-protokolle.de/Lexikon/Kardanische_Aufh%E4ngung.html: Kardanische Aufhängung.

[9] (16.11.2006) http://www.von-grambusch.de/: Alexander von Grambusch, Elektrotechniker bei der Firma Elektro Duschl GmbH in Kolbermoor. Heubergweg 12 D 83539 Pfaffing, 11 2006.

[10] (23.10.06) http://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/0209092.htm.

[11] Bartels, B. S.-B. . V. G. G.: Farbatlas Krankheiten und Schädlinge an landwirtschaftlichen Kulturpflanzen : Kartoffel, Zuckerrübe, Raps, Getreide, Mais, Sonnenblume, Hanf. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer, 1999.

[12] Beuth, K.: Bauelemente Elemente 2. Vogel Fachbuch, 2001.

[13] Bill Doherty, M. W.: PIN Diode Fundamentals. MicroNote-Series 701.

[14] Doctor Kalevi Hyyppä, P. E. I.: POSITION-SENSITIVE DEVICES AND SENSOR SYSTEMS FOR OPTICAL TRACKING AND DISPLACEMENT SENSING APPLICATIONS. Oulu University ISBN 951-42-5780-4 (PDF), Faculty of Technology, University of Oulu, 2000.

[15] D.PDF (06.12.2006) http://www.onsemi.com/pub/Collateral/LM324: Datenblatt OPV LM324.

[16] Hamamatsu: 2D PSD Signal Processing Circuit For Pin-cushion type PSD Type No. C9069 OPERATION MNAUAL DWG. No. K32-B60025 Fifth Issued MAY 09,2005.

[17] Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH (14.09.2006) http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_S/S5990-01_S5991-01.pdf: S5990-01_S5991-01.pdf.

[18] Hecht, E.: Optik. Oldenbourg Verlag, 2001.

[19] Hermann, U.: Knaurs etymologisches Lexikon Herkunft und Geschichte unserer Neu- und Fremdwörter. Droemersche Verlagsanstalt, 1983.

[20] Lehner, B.: KDE- und Qt-Programmierung GUI-Entwicklung für Linux. Addison-WESLEY, 2001.

[21] Manfred Seifart, P. D. sc. tech.: Analoge Schaltungen. VEB Verlag Technik Berlin, 1989.

[22] Michael Eichler, P. D.-I. G. C.: Lokalisierungssysteme für Pervasive Computing Universität Tübingen, 2003,2004.

[23] Nickel, T.: Simulation verschiedener Steuerstrategien für einen autonomen Industrieroboter für das Umwälzen von eingelagertem Getreide, 2006.

[24] Sauerburger, H. H.: Ubiquitous Computing. dpunkt.verlag, Heidelberg 2003.

[25] Schenk, D.-I. U. T. D. C.: Halbleiterschaltungstechnik. Springer, 1999.

[26] Schneider, P. D.-I. R. S. D.-I. D. W. D.-I. M.: Sachbericht zum Verwendungsnachweis im Kooperationsprojekt: Variable Positionsbestimmung, Navigation und Maschinensteuerung in Gebäuden Teilprojekt: Indoor-Positionierung mittlerer Reichweite für den industriellen Einsatz, 2005-2006.

[27] Wolfgang Zinth, U. Z.: Optik Lichtstrahlen-Wellen-Photonen. Oldenbourg Verlag München Wien, 2005.

6 Anhang

Schaltplan des neuen Prototyp

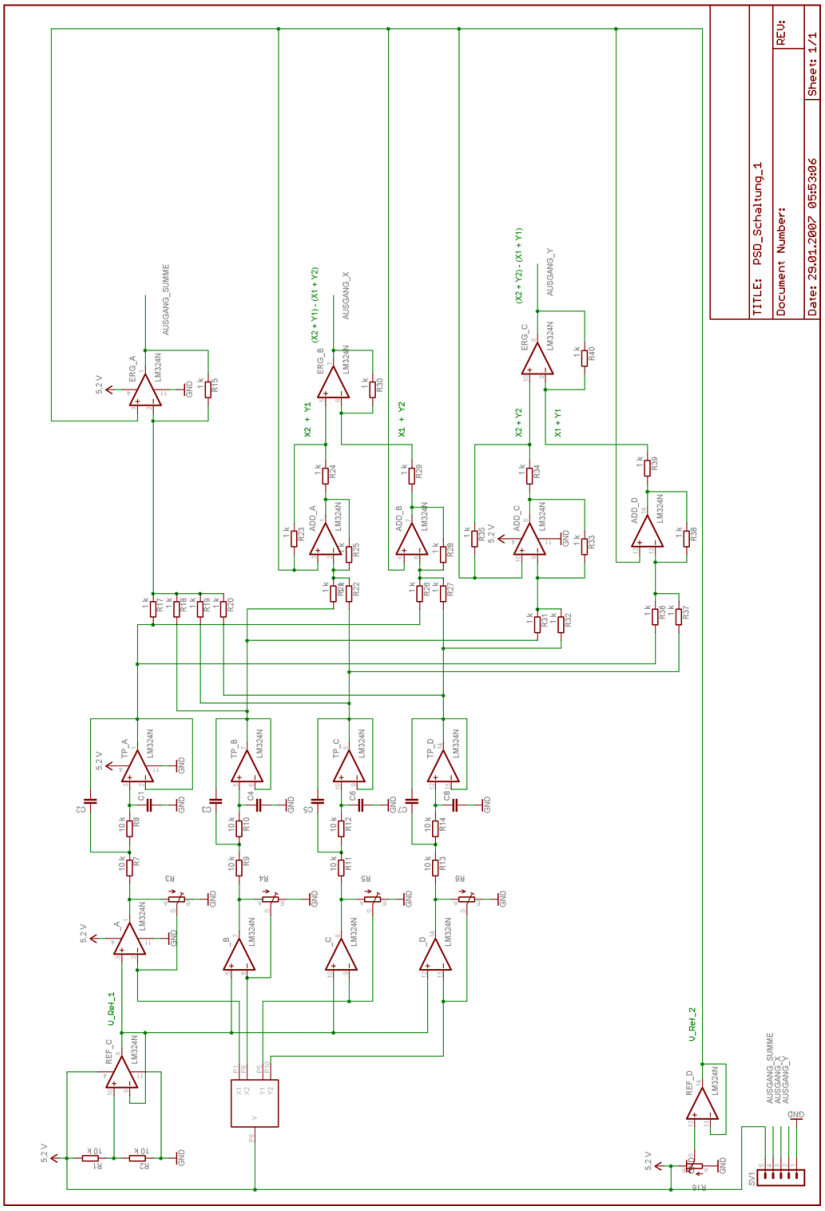

Abbildung 6.1: Eagle Schematic des neuen Prototyp

Eidesstattliche Versicherung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken habe ich als solche kenntlich gemacht.

Rostock, 31. Januar 2007 Jens Schulz

Danksagung

Hiermit möchte ich allen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. An erster Stelle danke ich meine Freundin Diana und meiner Familie Sie haben mich während des gesamten Studiums unterstützt und immer an mich geglaubt.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Institut für Angewandte Mikroelektronik und Datentechnik, besonders Prof. Ralf Salomon, für die unermüdliche Hilfe und Lösung fachlicher Probleme sowie für die gute Zusammenarbeit.